

# **UNIVERSIDAD DEL NORTE**

Departamento de Ingeniería Industrial



DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA DE CONTROL DE MODELOS DINÁMICOS  
DE INVENTARIOS MULTI-PRODUCTO, BASADA EN LA TEORÍA DE CONTROL  
PREDICTIVO, PARA REDUCCIÓN DE COSTO DE INVENTARIOS EN  
PROCESOS CON DINÁMICAS DE ABASTECIMIENTO VARIABLES.

## **TESIS**

Para la obtención del título de:

Magíster en Ingeniería Industrial

INGRID NATHALIA HERNÁNDEZ MEDINA

Barranquilla, Colombia

2017

**UNIVERSIDAD DEL NORTE**

Departamento de Ingeniería Industrial



DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA DE CONTROL DE MODELOS DINÁMICOS  
DE INVENTARIOS MULTI-PRODUCTO, BASADA EN LA TEORÍA DE CONTROL  
PREDICTIVO, PARA REDUCCIÓN DE COSTO DE INVENTARIOS EN  
PROCESOS CON DINÁMICAS DE ABASTECIMIENTO VARIABLES.

Para la obtención del título de:

Magíster en Ingeniería Industrial

**INGRID NATHALIA HERNÁNDEZ MEDINA**

Trabajo dirigido por:

**Marco E. Sanjuán, PhD.**

**Alcides Santander, PhD.**

Barranquilla, Colombia

2017

Aprobado por el profesorado de la División de Ingenierías en cumplimiento de los requisitos exigidos para otorgar el título de Magister en Ingeniería Industrial

---

Marco E. Sanjuán Mejía, PhD.

Firma del Director

---

Alcides R. Santander Mercado, PhD.

Firma del Director

---

Rene A. Amaya Mier, PhD.

Evaluador del Proyecto

---

Lina M. Prada Angarita, MSc.

Evaluador del Proyecto

Barranquilla, 2017

## Agradecimientos

*Gracias a Dios por la bendición de hacer mi sueño realidad y por asegurarse de hacerme sentir su presencia en mi vida todos los días. A mi mamá, por esperar con dulzura cada noche mi llamada y saber sopesar los sacrificios de la distancia. A mi papá, por alentarme y guiarme en cada momento. A mi familia, por sus oraciones y paciencia en todo el proceso, por sentir mi logro como el suyo. A la Ingeniera Elizabeth Acosta, por dejarme ser parte de sus vidas y darme más que su voto de confianza, su cariño y su amistad. Al Ingeniero Marco Sanjuán, por creer en mí y permitirme ser parte de su equipo, porque con su particular humor, apoyo y enseñanzas como un padre hizo de mí una mujer más segura y fuerte. A mi amor Diego Guillen, por su incondicional apoyo, su comprensión y su genial habilidad para sacar de mí una enorme sonrisa. Al Ingeniero Alcides Santander por sus enseñanzas de vida. A aquellos que amablemente me brindaron un poco de su tiempo y conocimiento para hacer posible el desarrollo de este proyecto, en especial a Iván Portnoy, por contribuir con su experticia en esta investigación, por acompañarme, apoyarme, animarme y en especial por su valiosa amistad. A María Amalia Jubíz, por su amistad y por enseñarme de Dios. A Javier Jiménez y Kevin Meléndez, por su dedicación, apoyo y amistad que superaron la distancia. A todos mis compañeros y amigos que hicieron parte de este proceso gracias.*

*Nathalia Hernández*

*“No sólo no hubiera sido nada sin ustedes, sino con toda la gente que estuvo a mi alrededor desde el comienzo. Algunos siguen hasta hoy. ¡Gracias... totales!”.*

*Gustavo Cerati*

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	24
1.1. Planteamiento del Problema.....	25
1.2. Justificación.....	26
1.2.1. Teórica.....	26
1.2.2. Práctica .....	27
1.3. Objetivos.....	28
1.3.1. Objetivo General .....	28
1.3.2. Objetivos Específicos.....	28
1.4. Estructura del documento.....	28
2. ESTADO DEL ARTE.....	29
2.1. Gestión de Inventarios.....	29
2.2. Aplicaciones de Teoría de Control de Procesos en el Sector Industrial.....	30
2.3. Aplicación de la Teoría de Control a la Gestión de Inventarios. ....	30
2.4. Análisis de Hallazgos en el Estado del Arte .....	31
2.5. Análisis de brechas.....	35
3. METODOLOGIA.....	36
4. CONTEXTUALIZACIÓN DEL ENFOQUE PROPUESTO .....	37
4.1. Conceptos fundamentales .....	38
4.1.1. Representación de modelos dinámicos de procesos .....	38
4.1.2. Teoría clásica de control de procesos – Estrategias PID.....	39
4.1.3. Control dinámico matricial - DMC.....	40
4.2. Caracterización de los sistemas .....	44
4.2.1. Sistema tipo taller de producción intermitente o Job Shop .....	44
4.2.2. Sistemas tipo taller flexible de producción continuo o flexible flow shop....	44
4.2.3. Demanda .....	45
4.2.4. Pronósticos de demanda.....	47
4.3. Tiempo de espera o lead time .....	48
4.4. Programación de producción .....	50
4.4.1. Tiempo de entrega de productos o Due Date .....	50
4.4.2. Metodología de programación de producción: Cuello de botella.....	51
4.4.3. Metodología de programación de producción: Cuello de botella híbrido.	52
4.5. Sensores.....	53

4.6.	Actuadores .....	53
4.7.	Política de gestión de inventarios.....	54
4.8.	Supuestos.....	54
5.	MODELO MATEMÁTICO PARA CONTROL DE COSTOS DE INVENTARIOS .....	55
6.	PROCESOS PRODUCTIVOS.....	59
6.1.	Proceso productivo Job Shop.....	59
6.2.	Proceso productivo Flexible Flow Shop .....	62
7.	Implementación de las estrategias de control.....	65
7.1.	Implementación y sintonía de la estrategia clásica de control .....	65
7.1.1.	Proceso productivo Job Shop.....	65
7.1.2.	Proceso productivo Flexible Flow Shop.....	69
7.2.	Implementación y sintonía de la estrategia de control - DMC.....	73
7.2.1.	Proceso productivo Job Shop.....	73
7.2.2.	Proceso productivo Flexible Flow Shop.....	77
8.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	81
8.1.	Análisis proceso Job Shop.....	83
8.2.	Análisis proceso Flexible Flow Shop .....	85
8.3.	Diseño de experimentos.....	91
8.3.1.	Diseño de experimentos proceso Job Shop.....	92
8.3.2.	Diseño de experimentos proceso Flexible Flow Shop.....	99
8.4.	Costos .....	106
9.	CONCLUSIONES.....	111
	Anexo 1. Taxonomía Gestión de Inventarios. ....	126
	Anexo 2. Taxonomía de Aplicaciones de la Teoría de Control de Procesos en el Sector Industrial. ....	129
	Anexo 3. Taxonomía Aplicación de la Teoría de Control a la Gestión de Inventarios. .	134
	Anexo 4. Implementación PID al proceso JS con D1 - P1.....	142
	Anexo 5. Implementación PID al proceso JS con D1 – P2. ....	144
	Anexo 6. Implementación PID al proceso JS con D1 – P3. ....	146
	Anexo 7. Implementación PID al proceso JS con D2 – P1. ....	149
	Anexo 8. Implementación PID al proceso JS con D2 – P2. ....	151
	Anexo 9. Implementación PID al proceso JS con D2 – P3. ....	154
	Anexo 10. Implementación PID al proceso JS con D3 – P1.....	156

Anexo 11. Implementación PID al proceso JS con D3 – P2.....	159
Anexo 12. Implementación PID al proceso JS con D3 – P3.....	161
Anexo 13. Implementación PID al proceso FFS con D1 – P1. ....	164
Anexo 14. Implementación PID al proceso FFS con D1 – P2. ....	168
Anexo 15. Implementación PID al proceso FFS con D1 – P3. ....	173
Anexo 16. Implementación PID al proceso FFS con D2 – P1. ....	179
Anexo 17. Implementación PID al proceso FFS con D2 – P2. ....	184
Anexo 18. Implementación PID al proceso FFS con D2 – P3. ....	190
Anexo 19. Implementación PID al proceso FFS con D3 – P1. ....	195
Anexo 20. Implementación PID al proceso FFS con D3 – P2. ....	201
Anexo 21. Implementación PID al proceso FFS con D3 – P3. ....	206
Anexo 22. Implementación DMC al proceso JS con D1 – P1.....	212
Anexo 23. Implementación DMC al proceso JS con D1 – P2.....	214
Anexo 23. Implementación DMC al proceso JS con D1 – P3.....	216
Anexo 24. Implementación DMC al proceso JS con D2 – P1.....	219
Anexo 25. Implementación DMC al proceso JS con D2 – P2.....	221
Anexo 26. Implementación DMC al proceso JS con D2 – P3.....	224
Anexo 27. Implementación DMC al proceso JS con D3 – P1.....	226
Anexo 28. Implementación DMC al proceso JS con D3 – P2.....	229
Anexo 29. Implementación DMC al proceso JS con D3 – P3.....	231
Anexo 30. Implementación DMC al proceso FFS con D1 – P1.....	234
Anexo 31. Implementación DMC al proceso FFS con D1 – P2.....	238
Anexo 32. Implementación DMC al proceso FFS con D1 – P3.....	243
Anexo 33. Implementación DMC al proceso FFS con D2 – P1.....	249
Anexo 34. Implementación DMC al proceso FFS con D2 – P2.....	254
Anexo 35. Implementación DMC al proceso FFS con D2 – P3.....	260
Anexo 36. Implementación DMC al proceso FFS con D3 – P1.....	265
Anexo 37. Implementación DMC al proceso FFS con D3 – P2.....	271
Anexo 38. Implementación DMC al proceso FFS con D3 – P3.....	276
Anexo 39. Costos del Sistema de Inventarios Proceso JS.....	282
Anexo 40. Costos del Sistema de Inventarios Proceso FFS.....	287

## LISTA DE FIGURAS

Ilustración 1 Clasificación de Publicaciones - Alcance del Modelo. ....	32
Ilustración 2 Clasificación de Publicaciones – Comportamiento de la demanda. ....	33
Ilustración 3 Clasificación de Publicaciones – Comportamiento del Lead Time. ....	34
Ilustración 4 Clasificación de Publicaciones - Matemática del Modelo. ....	35
Ilustración 5 Sistema de almacenamiento. ....	37
Ilustración 6 Respuesta escalón. ....	41
Ilustración 7 Sistema de producción tipo taller genérico. ....	44
Ilustración 8 Sistema flexible de manufactura genérico. ....	45
Ilustración 9 Patrón de demanda constante. ....	45
Ilustración 10 Patrón de demanda tendencial. ....	46
Ilustración 11 Patrón de demanda estacional. ....	46
Ilustración 12 Perturbaciones de demanda en el sistema ....	47
Ilustración 13 Distribución triangular. ....	49
Ilustración 14 Grafo de proceso productivo. ....	51
Ilustración 15 Sistema productivo Job Shop. ....	60
Ilustración 16 Diagrama de bloques lazo abierto para el sistema productivo Job Shop. .....	61
Ilustración 17 Sistema productivo Flexible Flow Shop. ....	63
Ilustración 18 Diagrama de bloques lazo abierto para el sistema productivo Flexible Flow Shop. ....	64
Ilustración 19 Diagrama de bloques capa $s=1$ – JS - PID. ....	65
Ilustración 20 Diagrama de bloques capa $s=2$ – JS - PID. ....	66
Ilustración 21 Diagrama de bloques capa $s=3$ – JS - PID. ....	66
Ilustración 22 Diagrama de bloques capa $s=4$ – JS - PID. ....	67
Ilustración 23 Diagrama de bloques capa $s=5$ – JS - PID. ....	67
Ilustración 24 Diagrama de bloques en lazo cerrado proceso Job Shop - PID. ....	68
Ilustración 25 Diagrama de bloques capa $s=1$ – FFS - PID. ....	69
Ilustración 26 Diagrama de bloques capa $s=2$ – FFS - PID. ....	69
Ilustración 27 Diagrama de bloques capa $s=3$ – FFS - PID. ....	70
Ilustración 28 Diagrama de bloques capa $s=4$ – FFS - PID. ....	70
Ilustración 29 Diagrama de bloques capa $s=5$ – FFS - PID. ....	71
Ilustración 30 Diagrama de bloques capa $s=6$ – FFS - PID. ....	71
Ilustración 31 Diagrama de bloques en lazo cerrado proceso Flexible Flow Shop – PID. .....	72
Ilustración 32 Diagrama de bloques capa $s=1$ – JS – DMC. ....	73
Ilustración 33 Diagrama de bloques capa $s=2$ – JS – DMC. ....	74
Ilustración 34 Diagrama de bloques capa $s=3$ – JS – DMC. ....	74
Ilustración 35 Diagrama de bloques capa $s=4$ – JS – DMC. ....	75
Ilustración 36 Diagrama de bloques capa $s=5$ – JS – DMC. ....	75
Ilustración 37 Diagrama de bloques en lazo cerrado proceso Job Shop - DMC. ....	76



Ilustración 38 Diagrama de bloques capa $s=1$ – FFS – DMC.....	77
Ilustración 39 Diagrama de bloques capa $s=2$ – FFS – DMC.....	77
Ilustración 40 Diagrama de bloques capa $s=3$ – FFS – DMC.....	78
Ilustración 41 Diagrama de bloques capa $s=4$ – FFS – DMC.....	78
Ilustración 42 Diagrama de bloques capa $s=5$ – FFS – DMC.....	79
Ilustración 43 Diagrama de bloques capa $s=6$ – FFS – DMC.....	79
Ilustración 44 Diagrama de bloques en lazo cerrado proceso Flexible Flow Shop - DMC .....	80
Ilustración 45 Comportamiento del inventario en el tiempo.....	82
Ilustración 46 Variable PT 1 con PID en el proceso JS – D1 – P1.....	83
Ilustración 47 Variable PT 2 con PID en el proceso JS – D1 – P1.....	83
Ilustración 48 Variable PT 1 con DMC en el proceso JS – D1 – P1.....	84
Ilustración 49 Variable PT 2 con DMC en el proceso JS – D1 – P1.....	84
Ilustración 50 Variable PT 1 con PID en el proceso FFS – D1 – P1. ....	85
Ilustración 51 Variable PT 2 con PID en el proceso FFS – D1 – P1. ....	85
Ilustración 52 Variable PT 3 con PID en el proceso FFS – D1 – P1. ....	86
Ilustración 53 Variable PT 4 con PID en el proceso FFS – D1 – P1. ....	86
Ilustración 54 Variable PT 5 con PID en el proceso FFS – D1 – P1. ....	87
Ilustración 55 Variable PT 6 con PID en el proceso FFS – D1 – P1. ....	87
Ilustración 56 Variable PT 1 con DMC en el proceso FFS – D1 – P1.....	88
Ilustración 57 Variable PT 2 con DMC en el proceso FFS – D1 – P1.....	88
Ilustración 58 Variable PT 3 con DMC en el proceso FFS – D1 – P1.....	89
Ilustración 59 Variable PT 4 con DMC en el proceso FFS – D1 – P1.....	89
Ilustración 60 Variable PT 5 con DMC en el proceso FFS – D1 – P1.....	90
Ilustración 61 Variable PT 6 con DMC en el proceso FFS – D1 – P1.....	90
Ilustración 62 Gráfico probabilidad normal proceso JS.....	93
Ilustración 63 Homocedasticidad del factor A en el proceso JS.....	94
Ilustración 64 Homocedasticidad del factor B en el proceso JS.....	94
Ilustración 65 Homocedasticidad del factor C en el proceso JS.....	95
Ilustración 66 Homocedasticidad del factor D en el proceso JS. ....	95
Ilustración 67 Independencia proceso JS.....	96
Ilustración 68 Superficie de respuesta JS-TD1-E1.....	96
Ilustración 69 Superficie de respuesta JS-TD2-E1.....	97
Ilustración 70 Superficie de respuesta JS-TD3-E1.....	97
Ilustración 71 Superficie de respuesta JS-TD1-E2.....	98
Ilustración 72 Superficie de respuesta JS-TD2-E2.....	98
Ilustración 73 Superficie de respuesta JS-TD3-E2.....	98
Ilustración 74 Gráfico probabilidad normal proceso FFS.....	100
Ilustración 75 Homocedasticidad del factor A en el proceso FFS. ....	101
Ilustración 76 Homocedasticidad del factor B en el proceso FFS. ....	101
Ilustración 77 Homocedasticidad del factor C en el proceso FFS. ....	102
Ilustración 78 Homocedasticidad del factor D en el proceso FFS.....	102
Ilustración 79 Independencia proceso FFS.....	103
Ilustración 80 Superficie de respuesta FFS-TD1-E1.....	103

Ilustración 81 Superficie de respuesta FFS-TD2-E1 .....	104
Ilustración 82 Superficie de respuesta FFS-TD3-E1 .....	104
Ilustración 83 Superficie de respuesta FFS-TD1-E2 .....	105
Ilustración 84 Superficie de respuesta FFS-TD2-E2 .....	105
Ilustración 85 Superficie de respuesta FFS-TD3-E2 .....	105
Ilustración 86 Análisis de costos con la IAE. ....	106
Ilustración 87 Costos del sistema de almacenamiento JS – D1 – L1.....	107
Ilustración 88 Costos del sistema de almacenamiento FFS – D1 – L1. ....	110
Ilustración 89 Variable MP 1 con PID en el proceso JS – D1 – P1.....	142
Ilustración 90 Variable MP 2 con PID en el proceso JS – D1 – P1.....	142
Ilustración 91 Variable MP 3 con PID en el proceso JS – D1 – P1.....	142
Ilustración 92 Variable PP 1 con PID en el proceso JS – D1 – P1.....	142
Ilustración 93 Variable PP 2 con PID en el proceso JS – D1 – P1.....	143
Ilustración 94 Variable PP 3 con PID en el proceso JS – D1 – P1.....	143
Ilustración 95 Variable PP 4 con PID en el proceso JS – D1 – P1.....	143
Ilustración 96 Variable MP 1 con PID en el proceso JS – D1 – P2.....	144
Ilustración 97 Variable MP 2 con PID en el proceso JS – D1 – P2.....	144
Ilustración 98 Variable MP 3 con PID en el proceso JS – D1 – P2.....	144
Ilustración 99 Variable PP 1 con PID en el proceso JS – D1 – P2.....	144
Ilustración 100 Variable PP 2 con PID en el proceso JS – D1 – P2. ....	145
Ilustración 101 Variable PP 3 con PID en el proceso JS – D1 – P2. ....	145
Ilustración 102 Variable PP 4 con PID en el proceso JS – D1 – P2. ....	145
Ilustración 103 Variable PT 1 con PID en el proceso JS – D1 – P2.....	145
Ilustración 104 Variable PT 2 con PID en el proceso JS – D1 – P2.....	146
Ilustración 105 Variable MP 1 con PID en el proceso JS – D1 – P3. ....	146
Ilustración 106 Variable MP 2 con PID en el proceso JS – D1 – P3. ....	146
Ilustración 107 Variable MP 3 con PID en el proceso JS – D1 – P3. ....	147
Ilustración 108 Variable PP 1 con PID en el proceso JS – D1 – P3. ....	147
Ilustración 109 Variable PP 2 con PID en el proceso JS – D1 – P3. ....	147
Ilustración 110 Variable PP 3 con PID en el proceso JS – D1 – P3. ....	147
Ilustración 111 Variable PP 4 con PID en el proceso JS – D1 – P3. ....	148
Ilustración 112 Variable PT 1 con PID en el proceso JS – D1 – P3.....	148
Ilustración 113 Variable PT 2 con PID en el proceso JS – D1 – P3.....	148
Ilustración 114 Variable MP 1 con PID en el proceso JS – D2 – P1. ....	149
Ilustración 115 Variable MP 2 con PID en el proceso JS – D2 – P1. ....	149
Ilustración 116 Variable MP 3 con PID en el proceso JS – D2 – P1. ....	149
Ilustración 117 Variable PP 1 con PID en el proceso JS – D2 – P1. ....	149
Ilustración 118 Variable PP 2 con PID en el proceso JS – D2 – P1. ....	150
Ilustración 119 Variable PP 3 con PID en el proceso JS – D2 – P1. ....	150
Ilustración 120 Variable PP 4 con PID en el proceso JS – D2 – P1. ....	150
Ilustración 121 Variable PT 1 con PID en el proceso JS – D2 – P1.....	150
Ilustración 122 Variable PT 2 con PID en el proceso JS – D2 – P1.....	151
Ilustración 123 Variable MP 1 con PID en el proceso JS – D2 – P2. ....	151
Ilustración 124 Variable MP 2 con PID en el proceso JS – D2 – P2. ....	151

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

Ilustración 345 Variable PT 1 con PID en el proceso FFS – D3 – P3.....	210
Ilustración 346 Variable PT 2 con PID en el proceso FFS – D3 – P3.....	210
Ilustración 347 Variable PT 3 con PID en el proceso FFS – D3 – P3.....	210
Ilustración 348 Variable PT 4 con PID en el proceso FFS – D3 – P3.....	211
Ilustración 349 Variable PT 5 con PID en el proceso FFS – D3 – P3.....	211
Ilustración 350 Variable PT 6 con PID en el proceso FFS – D3 – P3.....	211
Ilustración 351 Variable MP 1 con DMC en el proceso JS – D1 – P1.....	212
Ilustración 352 Variable MP 2 con DMC en el proceso JS – D1 – P1.....	212
Ilustración 353 Variable MP 3 con DMC en el proceso JS – D1 – P1.....	212
Ilustración 354 Variable PP 1 con DMC en el proceso JS – D1 – P1.....	212
Ilustración 355 Variable PP 2 con DMC en el proceso JS – D1 – P1.....	213
Ilustración 356 Variable PP 3 con DMC en el proceso JS – D1 – P1.....	213
Ilustración 357 Variable PP 4 con DMC en el proceso JS – D1 – P1.....	213
Ilustración 358 Variable MP1 con DMC en el proceso JS – D1 – P2.....	214
Ilustración 359 Variable MP 2 con DMC en el proceso JS – D1 – P2.....	214
Ilustración 360 Variable MP 3 con DMC en el proceso JS – D1 – P2.....	214
Ilustración 361 Variable PP 1 con DMC en el proceso JS – D1 – P2.....	214
Ilustración 362 Variable PP 2 con DMC en el proceso JS – D1 – P2.....	215
Ilustración 363 Variable PP 3 con DMC en el proceso JS – D1 – P2.....	215
Ilustración 364 Variable PP 4 con DMC en el proceso JS – D1 – P2.....	215
Ilustración 365 Variable PT 1 con DMC en el proceso JS – D1 – P2.....	215
Ilustración 366 Variable PT 2 con DMC en el proceso JS – D1 – P2.....	216
Ilustración 367 Variable MP 1 con DMC en el proceso JS – D1 – P3.....	216
Ilustración 368 Variable MP 2 con DMC en el proceso JS – D1 – P3.....	216
Ilustración 369 Variable MP 3 con DMC en el proceso JS – D1 – P3.....	217
Ilustración 370 Variable PP 1 con DMC en el proceso JS – D1 – P3.....	217
Ilustración 371 Variable PP 2 con DMC en el proceso JS – D1 – P3.....	217
Ilustración 372 Variable PP 3 con DMC en el proceso JS – D1 – P3.....	217
Ilustración 373 Variable PP 4 con DMC en el proceso JS – D1 – P3.....	218
Ilustración 374 Variable PT 1 con DMC en el proceso JS – D1 – P3.....	218
Ilustración 375 Variable PT 2 con DMC en el proceso JS – D1 – P3.....	218
Ilustración 376 Variable MP 1 con DMC en el proceso JS – D2 – P1.....	219
Ilustración 377 Variable MP 2 con DMC en el proceso JS – D2 – P1.....	219
Ilustración 378 Variable MP 3 con DMC en el proceso JS – D2 – P1.....	219
Ilustración 379 Variable PP 1 con DMC en el proceso JS – D2 – P1.....	219
Ilustración 380 Variable PP 2 con DMC en el proceso JS – D2 – P1.....	220
Ilustración 381 Variable PP 3 con DMC en el proceso JS – D2 – P1.....	220
Ilustración 382 Variable PP 4 con DMC en el proceso JS – D2 – P1.....	220
Ilustración 383 Variable PT 1 con DMC en el proceso JS – D2 – P1.....	220
Ilustración 384 Variable PT 2 con DMC en el proceso JS – D2 – P1.....	221
Ilustración 385 Variable MP 1 con DMC en el proceso JS – D2 – P2.....	221
Ilustración 386 Variable MP 2 con DMC en el proceso JS – D2 – P2.....	221
Ilustración 387 Variable MP 3 con DMC en el proceso JS – D2 – P2.....	222
Ilustración 388 Variable PP 1 con DMC en el proceso JS – D2 – P2.....	222



[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

Ilustración 609 Variable PT 3 con DMC en el proceso FFS – D3 – P3.....	280
Ilustración 610 Variable PT 4 con DMC en el proceso FFS – D3 – P3.....	281
Ilustración 611 Variable PT 5 con DMC en el proceso FFS – D3 – P3.....	281
Ilustración 612 Variable PT 6 con DMC en el proceso FFS – D3 – P3.....	281
Ilustración 613 Costos del sistema de almacenamiento JS – D2 – L1. ....	284
Ilustración 614 Costos del sistema de almacenamiento JS – D3 – L1. ....	285
Ilustración 615 Costos del sistema de almacenamiento JS – D1 – L2. ....	285
Ilustración 616 Costos del sistema de almacenamiento JS – D2 – L2. ....	286
Ilustración 617 Costos del sistema de almacenamiento JS – D3 – L2. ....	286
Ilustración 618 Costos del sistema de almacenamiento FFS – D2 – L1.....	292
Ilustración 619 Costos del sistema de almacenamiento FFS – D3 – L1.....	293
Ilustración 620 Costos del sistema de almacenamiento FFS – D1– L2.....	294
Ilustración 621 Costos del sistema de almacenamiento FFS – D2– L2.....	295
Ilustración 622 Costos del sistema de almacenamiento FFS – D3– L2.....	296

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Explosión Materia prima ( $j=1,2,3$ ) - Producto en proceso ( $l=1,2$ ) .....	59
Tabla 2 Producto en proceso ( $vs=1,2$ ) - Producto en proceso ( $vs=3,4$ ).....	59
Tabla 3 Producto terminado ( $i=1,2$ ) - Producto en proceso ( $vs=3,4$ ) .....	59
Tabla 4 Factores para el diseño de experimentos. ....	91
Tabla 5 Secuencia operacional diseño de experimentos proceso JS.....	92
Tabla 6 ANOVA proceso JS.....	93
Tabla 7 Secuencia operacional diseño de experimentos proceso FFS .....	99
Tabla 8 ANOVA proceso FFS. ....	100
Tabla 9 Costos del sistema de almacenamiento JS - D1 - L1 .....	108
Tabla 10 Costos del sistema de almacenamiento FFS - D1 - L1. ....	109
Tabla 11 Costos del sistema de almacenamiento JS - D2 - L1.....	282
Tabla 12 Costos del sistema de almacenamiento JS - D3 - L1.....	282
Tabla 13 Costos del sistema de almacenamiento JS - D1 - L2.....	283
Tabla 14 Costos del sistema de almacenamiento JS - D2 - L2.....	283
Tabla 15 Costos del sistema de almacenamiento JS - D3 - L2.....	284
Tabla 16 Costos del sistema de almacenamiento FFS - D2. ....	287
Tabla 17 Costos del sistema de almacenamiento FFS - D3.....	288
Tabla 18 Costos del sistema de almacenamiento FFS - D1 - L2. ....	289
Tabla 19 Costos del sistema de almacenamiento FFS - D2 - L2. ....	290
Tabla 20 Costos del sistema de almacenamiento FFS - D3 - L2. ....	291

## INTRODUCCIÓN

El comportamiento variable del mercado ha generado un continuo crecimiento de las capacidades de almacenamiento y un ascenso en la complejidad de las cadenas de abastecimiento. Este comportamiento genera un efecto agregado de inercia a través del sistema, mediante el aumento en la variabilidad de la dinámica de los factores incidentes en los sistemas de inventarios tales como la demanda, el tiempo de abastecimiento, el comportamiento del mercado, entre otros. El comportamiento variable de estos factores mencionados genera grandes pérdidas económicas, las cuales son consideradas uno de los problemas de mayor impacto en los sistemas productivos.

Con el fin de atenuar los cambios súbitos de estos factores y responder a las necesidades del mercado, los diferentes eslabones en la cadena de suministro se han apoyado en los sistemas de inventarios. La necesidad de determinar el correcto tipo y nivel de productos almacenados ha generado la necesidad de establecer una política en los sistemas de inventarios como estrategia para aumentar el nivel de cumplimiento de servicio por parte de las empresas. Dichas políticas de inventarios han sido basadas a lo largo de la historia en modelos que ejercen monitoreo en el sistema, los cuales toman acción de manera anticipada cuando las cantidades de inventario se encuentran en el punto de reorden, sin ejercer control en el proceso.

La variabilidad del mercado hace que los resultados obtenidos a partir de las metodologías mencionadas no brinden una herramienta robusta para el establecimiento de una política de inventarios para la cantidad y el periodo de pedido. Esta condición genera grandes costos por almacenamiento cuando se presenta exceso de inventario o costos asociados a faltantes y disminución en el nivel de servicio cuando se presenta déficit de inventario [1]. El objetivo de esta investigación es diseñar una metodología que permita ejercer control de inventarios para sistemas multi-producto, cuya demanda siga un patrón estocástico y que esté en la capacidad de gestionar materia prima, producto en proceso y producto terminado. La política de inventarios buscará minimizar los costos y aumentar el nivel de servicio del sistema teniendo en cuenta las variaciones en el lead time.

Para dar cumplimiento al objetivo anterior, inicialmente se hará una caracterización y análisis del estado del arte con el fin de determinar el aporte que se puede realizar entorno a esta problemática, mediante la revisión de las propuestas realizadas por los múltiples autores en la literatura hasta la fecha. En segunda instancia se construirá un modelo dinámico continuo que permita describir las etapas del proceso, con el fin de establecer una base que describa adecuadamente el fenómeno. Partiendo de lo anterior se procederá con el diseño del modelo dinámico de característica discreta, que evidencie el comportamiento de los inventarios en el sistema.



Con base en este modelo se diseñará e implementará una estrategia de control aplicable a la problemática planteada. Finalmente se evaluará el desempeño de esta metodología de solución mediante una simulación computacional de diferentes marcos de operación y otras estrategias de control.

### **1.1. Planteamiento del Problema**

El inventario es una estrategia de protección ante las fluctuaciones de la demanda, puesto que si la demanda fuera determinística no deberíamos tener inventario más allá de lo requerido para amortiguar el efecto de fallas del proceso. En el año 2002, Gruen [2] realizó un exhaustivo trabajo en donde reveló el comportamiento del mercado cuando la empresa incurre en incumplimiento de la demanda. Este autor establece que el 9% de los compradores desisten en la adquisición del producto, por el contrario, el 26% sustituyen el producto por otro de la misma marca, el 31% cambian de tienda, el 19% reemplazan el producto por otro de diferente marca y finalmente tan solo el 15% retrasan la compra. Por otra parte, Verhoef et al en 2006 [3], concluyen que el 23% de los consumidores que encuentran exceso de demanda retrasan la su compra del producto [4].

Mantener un nivel inapropiado de inventario tiene un impacto significativo en el desempeño económico de las empresas. Un ejemplo de esto fue representado en la revista Dinero [5], en donde se registra la caída en los ingresos del mayor fabricante de maquinaria pesada en el mundo, Caterpillar, dado entre otros factores a la variabilidad de las divisas que convirtieron un nivel de inventario apropiado en un nivel costoso de inventario. Esto obligó a replantear su política de inventarios tradicional, demostrando que podían mantener el nivel del servicio con un nivel de inventario menor al que manejaban. Consecuencia de esto los distribuidores redujeron en aproximadamente 1.000 millones de dólares sus compras a la casa matriz [5].

Por otra parte, el informe emitido en el 2014 por la ANDI (Asociación Nacional de Empresarios de Colombia) [6] destaca la economía colombiana por su buen desempeño a nivel internacional, logrando un cumplimiento del presupuesto del 96%, manteniendo inventarios estables y conservando un ambiente favorable a los negocios. Sin embargo, esta señala de igual forma que la industria manufacturera no responde a las expectativas económicas en el año anterior, mostrando una tendencia negativa en producción y ventas en el último periodo. Este documento registra que el sector industrial a pesar de declarar como estables sus inventarios, el 19,0% de los empresarios califica su nivel de inventario como alto, lo cual generará pérdidas económicas millonarias en el sector industrial [6].

Dada la importancia de la gestión de inventarios en el sector, múltiples autores han abordado esta temática mediante técnicas de monitoreo entorno al punto de re orden, entre las que se encuentran el modelo clásico de cantidad económica de pedido [7], el

modelo dinámico de cantidad económica de pedido [7], los modelos probabilísticos de inventarios (EOQ) [7], los modelos de revisión continua [7], entre otras metodologías que permiten la identificación de patrones, pronósticos para atender la variabilidad de la demanda y el análisis del efecto látigo en los eslabones de la cadena de suministro. Sin embargo, estas técnicas se ven limitadas por supuestos no ceñidos a las condiciones reales del sector industrial, como la presunción de valores para lead time constantes, límites de capacidad de almacenamiento infinito, capacidades ilimitadas de maquinaria, demandas conocidas y constantes, entre otros factores que debilitan los resultados obtenidos con estas técnicas [8] [9].

Considerando la incertidumbre en el comportamiento de la demanda del mercado, las limitaciones de las técnicas clásicas y las consecuencias de una mala gestión en los sistemas de inventarios como se mencionó anteriormente, evidencia la necesidad de diseñar una metodología que ejerza control en los sistemas de almacenamiento, abordando la gestión de inventarios con una estructura jerárquica, conectando la demanda y objetivos de producción con la gestión de inventarios a escala de operación unitaria. La metodología que se desarrolla en esta investigación es enfocada a grandes empresas, la implementación de esta metodología permite minimizar los costos asociados a los inventarios, mediante el control de los niveles en el sistema de almacenamiento, considerando la incertidumbre de los factores externos al proceso.

## **1.2. Justificación**

### **1.2.1. Teórica**

En el área de investigación de operaciones, la gestión de inventarios ha sido abordada desde la teoría clásica de control de procesos desde los años 50 [10] [11] [12], convirtiéndose en objeto de investigación por parte de múltiples autores, los cuales desde entonces hasta la actualidad han realizado aportes mediante la integración de varios enfoques de estas áreas. El primer autor interesado en este enfoque fue Simon [11] en su documento “On the application of servomechanism theory in the study of production control”, en donde expone la problemática entorno a la gestión de inventarios y propone una metodología basada en modelos de tiempo continuo como solución. En los siguientes años se desarrollaron propuestas entorno a sistemas de producción monoproducto, considerando la demanda y el lead time como factores determinísticos. Años más tarde, Bonney [13] expandió el área de investigación en su artículo “Design of production control systems: choice of system structure and systems implementation sequence” dando una propuesta para empresas multi-producto. Múltiples autores han centrado el enfoque de su investigación en el desarrollo de modelos que brinden una alternativa de solución, con base en técnicas de control desde sus enfoques clásicos hasta los más avanzados.

A pesar del interés de múltiples autores por resolver el problema de la gestión de inventarios en los posibles entornos de operación, la mayoría de los aportes de investigación realizados consideran modelos de tiempo continuo, demanda de comportamiento determinístico y lead time conocido, desarrollados entorno a procesos mono-producto, motivo por el cual la solución de estos modelos representa escenarios no reales en la práctica [14]. Las variaciones en las características de la política de inventarios, los cambios en los parámetros y las diversificaciones en cada variable de entrada, evidencian la necesidad de diseñar una estrategia generalizable y robusta que plantee una estrategia de control de inventarios, la cual considere:

- ✓ Gestión dinámica interna de inventario en los eslabones de la cadena de suministro.
- ✓ Teoría de control de procesos.
- ✓ Sistemas multi-producto

Con el objetivo de reducir costos y generar una opción robusta para la solución de esta problemática. Además, se espera que esta propuesta de investigación sea transferible a cualquier tipo de industria u otra área de aplicación.

### **1.2.2. Práctica**

La política de inventarios es un factor importante en el desarrollo y crecimiento de las empresas, puesto que la misma es la encargada de establecer el proceder dentro sistema de producción para la satisfacción de la demanda en el mercado. El exceso de inventario genera grandes costos a la empresa [2] [5] y por el contrario un déficit del mismo aumenta la probabilidad de incumplir con lo solicitado por el mercado generando pérdidas en ventas [3] [8] [6]. A pesar del conocimiento de la incidencia y la relevancia de la gestión de inventarios, las empresas del sector industrial no tienen conciencia en la determinación de la política de inventarios para evaluar las implicaciones de estas estrategias en el desempeño de los sistemas productivos. La política de inventario implica el establecimiento de los lineamientos para la gestión de compras de materias primas y suministros, determinación de las cantidades en los procesos de fabricación y las decisiones en el almacenamiento de inventarios, entre otros factores variables dentro del mercado [15], motivo por el cual las decisiones que se toman en torno a la gestión de dichos parámetros cuentan con un alto grado de complejidad y requieren de responsabilidad. Sin embargo, la gran mayoría de las empresas toman estas decisiones basándose en conocimiento tácito o experiencia, lo que puede conllevar a cometer errores en las cantidades de compra de materia prima, los tamaños de producción y las referencias a fabricar, así como la asignación de recursos para almacenamiento, entre otros. Con esta investigación se espera mejorar el desempeño de las políticas de inventarios mediante un modelo de soporte a las decisiones asociadas a la política de inventarios, considerando la variabilidad de la demanda del mercado y la dinámica de los factores asociados al cumplimiento de la misma.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Diseñar una metodología de control de modelos dinámicos de inventarios, basada en la teoría de control predictivo, para la reducción de costo de inventarios en procesos con dinámicas de abastecimiento variables y demanda estocástica.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- ✓ Caracterizar y analizar el estado del arte de los métodos de gestión de inventarios, incluyendo resultados que reporten el uso de la teoría de control, para identificar las brechas relevantes de investigación.
- ✓ Construir un modelo dinámico continuo que permita describir las etapas de abastecimiento, recibo, despacho, almacenamiento y entrega multi-producto, que sirva como base para el diseño de un método de gestión y control de inventario.
- ✓ Identificar un modelo dinámico de característica discreta, multi-producto, con el fin de plantear un modelo matemático capaz de caracterizar el comportamiento de los inventarios en el sistema.
- ✓ Diseñar e implementar una estrategia de control aplicable a la problemática planteada, conforme a las características deseadas para la política de inventarios.
- ✓ Evaluar la metodología de solución planteada, mediante una simulación computacional del comportamiento del sistema y el desempeño de la estrategia de control propuesto frente a la dinámica del mercado.

### **1.4. Estructura del documento**

La problemática planteada se aborda a lo largo del documento de la siguiente manera: En el capítulo 2 se presenta una revisión del estado del arte, en donde se aborda la temática en tres enfoques principales: gestión de inventarios, aplicaciones de teoría de control de procesos en el sector industrial y aplicaciones de la teoría de control a la gestión de inventarios, a partir de los resultados de este segmento se identifica el área en la que se centrará el aporte de la investigación. En el capítulo 3 se expone la metodología para abordar la problemática planteada, la cual se desarrolla a partir del capítulo 4 de este documento con el marco teórico y la contextualización del modelo dinámico que se plantea, las cuales son expuestas como modelo matemático en el capítulo 5. En el capítulo 6 se presentan estrategias de control aplicables a la problemática adicionales al control predictivo, con el fin de realizar la integración de las mismas al modelo desarrollado y evaluar su desempeño. Finalmente se presentan el análisis de resultados en el capítulo 7 y las conclusiones y futuras investigaciones en el capítulo 8.

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. Gestión de Inventarios

Los inventarios son considerados como un factor de gran utilidad e importancia en las empresas, dado que estos soportan el sistema para dar cumplimiento a la demanda del sector. Sin embargo, la incertidumbre en la cantidad y tipo de demanda puede generar faltantes o exceso de productos, impactando negativamente la economía. Por otra parte, el inventario le permite a la empresa protegerse de la variación de la demanda, aumentando el nivel de servicio y brindando una protección en la variación del tiempo de entrega de los insumos para producir [7].

Estas características dan al sistema flexibilidad en la producción y a su vez establecen la necesidad de determinar una política que soporte las decisiones entorno a la cantidad de inventario y el periodo en que se debe solicitar el mismo, dado que la respuesta puede variar según el contexto de la problemática planteada con anterioridad [16].

Con el fin de responder a esta necesidad, múltiples autores a lo largo de la historia han centrado sus esfuerzos en desarrollar modelos que planteen una solución a la adecuada gestión de inventarios. Scarf [17] presentó uno de los primeros documentos en torno a este tema, considerando un comportamiento estocástico en la demanda para un sistema mono-producto, abriendo de esta manera la puerta a otros autores que continuaron su línea de investigación, como Bordley [18]. Este autor realizó un aporte a esta problemática con un enfoque determinista en la demanda para sistemas para multi-producto, extendiendo las fronteras de investigación y contemplando nuevas oportunidades de investigación en el desarrollo de esta temática, considerando variaciones en el tiempo de aprovisionamiento, características de demanda, enfoques mono-producto, multi-producto y la aplicabilidad de otras ciencias en la solución de esta problemática.

El valor del tiempo de aprovisionamiento o lead time fue incluido por autores como Morton [19], Van [20], Janakiraman [21], entre muchos otros, los cuales consideraron un comportamiento variable en esta característica gracias al carácter dinámico de sus componentes. Por otra parte autores como Johansen [22], Chiang [23], consideraron la misma como constante para simplificar sus modelos y autores como Xiao [24] y Guirong [25], continuaron estableciendo propuestas a la gestión y control de inventarios sin considerar esta variable en las mismas.

En el anexo 1 se detallan los artículos citados entorno a la importancia y manejo de la gestión de inventarios durante la historia, discriminando el alcance del modelo, la implementación de herramientas de pronósticos, de igual forma el comportamiento del lead time y la demanda para cada uno.

## **2.2. Aplicaciones de Teoría de Control de Procesos en el Sector Industrial**

La teoría clásica de control de procesos es considerada como una poderosa herramienta para la automatización de procesos industriales, la cual brinda al sector manufacturero la posibilidad de controlar variables de carácter dinámico durante el desarrollo del proceso, mediante la manipulación de parámetros iniciales que influyan en el comportamiento de la variable controlada [26].

Múltiples autores se han basado tanto en técnicas clásicas de control como en técnicas de control avanzado las cuales han sido implementadas como soluciones en áreas como calidad, control de procesos, control de producción, cadena de suministro, efecto látigo, economía, control de inventarios, entre otros.

En 1951 Cooper dio inicio a la implementación de estas teorías en el entorno industrial, mediante el desarrollo un documento en donde utiliza la teoría de control de procesos para estructurar un método de solución entorno a problemas desarrollados en el sector económico [10]. En el área de control de calidad Christensen realizó una propuesta basada en dinámica de sistemas [27], temática que también fue cubierta por Ioannidis mediante la estructuración de funciones de transferencia [28]. Burns propuso una aplicación de la teoría clásica de control basada en el método de característica continua, para establecer una solución en la gestión de la cadena de suministro [29]. Esta problemática también fue abordada por Sourirajan a través de un método discreto [30], un enfoque similar fue propuesto por Schwartz, quien abarcó esta situación con base en la misma técnica de control y método matemático de solución [31]. Por otra parte, Coley tomó la dinámica de sistemas como base para el desarrollo del control de producción [32], años más tarde, Wetenschappien implementó modelos de característica continua para establecer una solución al efecto látigo [33].

Fu presentó una metodología de solución para este problema basado en los modelos de control predictivo [34], estos son solo unos de las múltiples implementaciones del control de procesos a las áreas del sector industrial que fueron evaluadas en esta revisión bibliográfica. En el anexo 2 se referencian los artículos que se consideraron representativos para poder guiar al lector en los entornos en los que se ha dado cabida al desarrollo la teoría de control de procesos en el sector industrial.

## **2.3. Aplicación de la Teoría de Control a la Gestión de Inventarios.**

Con el fin de diseñar una metodología para la gestión dinámica de inventarios, se evaluó el comportamiento de los parámetros de entrada, las variables del proceso y las características de los resultados obtenidos en cada uno de los modelos propuestos por los autores desde los años 50, en donde han presentado alternativas para establecer una política de inventarios con el fin de reducir los costos de los inventarios.

Simon fue el primer autor que desarrollo una investigación en torno a esta problemática, en la cual definió un modelo de solución con característica de respuesta análoga para el control de inventarios de una empresa mono-producto [11], abriendo consigo la ventana a múltiples desarrollos que mejorarían la propuesta realizada por el autor. Tres años después Vassaian realizó una propuesta de solución alternativa de carácter muestreado, considerando factores como el valor del lead time constante y el comportamiento de la demanda, para de esta forma dar respuesta alternativa al sector industrial mono-producto a este problema [12]. Este modelo fue mejorado por Deziel, quien consideró el valor del lead time como variable para el desarrollo de la metodología de solución [35].

Bonney publicó un documento en el cual extendía las fronteras que se habían manejado hasta el momento, considerando un sistema de producción multi-producto, considerando un valor fijo para el lead time y un comportamiento determinístico de la demanda [13], haciendo un gran aporte en el crecimiento de esta línea de investigación. Hasta entonces las técnicas de control implementadas en cada metodología propuesta hacían parte de las técnicas clásicas de control. Towill planteó un método de solución basado en una técnica avanzada de control adaptativo, con comportamiento estocástico en la demanda y un método de respuesta análoga [36]. Estas técnicas avanzadas de control de procesos siguieron siendo implementadas en la solución de esta problemática gracias a la confiabilidad y utilidad de las mismas. Braun desarrolló un método muestreado basado en los MPC [37]. Más adelante autores como Aggelogiannaki [38] y Shwartz [39] fusionaron técnicas de control para optimizar los resultados de las metodologías establecidas. Las características de los artículos referenciados son mostradas el anexo 3 de este documento.

Al final de este documento se proporcionan otras referencias representativas que puede guiar al lector a explorar en profundidad los aportes realizados por los múltiples autores enfocados a esta área del control.

## **2.4. Análisis de Hallazgos en el Estado del Arte**

Los aportes de investigación realizados entorno a implementación de la teoría de control de procesos en la gestión dinámica de inventarios fueron presentados en la sección anterior. A partir de dichos hallazgos se desarrolló un análisis taxonómico de los artículos referenciados en los anexos 1, 2, 3 con el fin de identificar las brechas investigativas en los aportes realizados a la solución del problema planteado. A continuación, se presenta un análisis estadístico en donde se consideró el alcance de los modelos (multi-producto, mono-producto), comportamiento de la demanda (determinístico – dinámico), comportamiento del lead time (variable – constante) y la matemática del modelo empleado como solución (ecuaciones algebraicas, ecuaciones diferenciales, función de transformada Laplace, función de transformada Z, funciones de estado y ecuaciones de diferencia).

La flexibilidad del modelo para establecer la política de inventario en un sistema mono-producto o multi-producto, es la primera característica a evaluar en los artículos citados en el estado del arte. En la Ilustración 1 se discrimina el porcentaje de cobertura para cada caso, obteniendo como resultado que la literatura considera la implementación de la teoría de control a un sistema mono-producto con un porcentaje del 76% y con 24% para un sistema multi-producto. Como se evidencia, el gran porcentaje de la totalidad de los documentos centra sus esfuerzos en la modelación de metodologías para empresas mono-producto, las cuales en el sector industrial constituye una minoría de las compañías manufactureras.

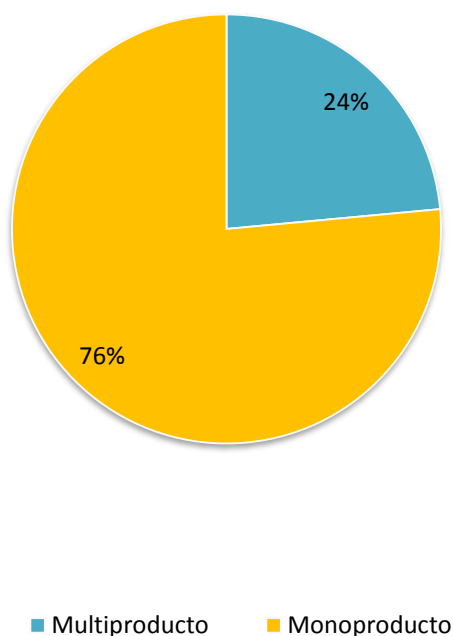


Ilustración 1 Clasificación de Publicaciones - Alcance del Modelo.

La demanda del mercado es la segunda propiedad a analizar en los documentos, esta característica es de orden dinámico en los sistemas productivos, dado que se ve influenciada por cambios en el mercado derivados de las condiciones políticas, ambientales, de transporte, disponibilidad de materias primas, entre otros. Con base en lo anterior, no es posible afirmar que la demanda del mercado sigue un comportamiento determinístico en un horizonte de tiempo. Esta condición repercute en la precisión de los modelos planteados que hacen este supuesto, los cuales corresponden al 71% de la totalidad de los documentos. Por lo tanto, existe una oportunidad de crecer en el desarrollo de investigaciones en donde se considere la demanda con características



estocásticas, dado que solo comprenden el 23% de la totalidad de las referencias y el 6% restante de estos no establecen un patrón para esta variable, como se ve en la Ilustración 2.

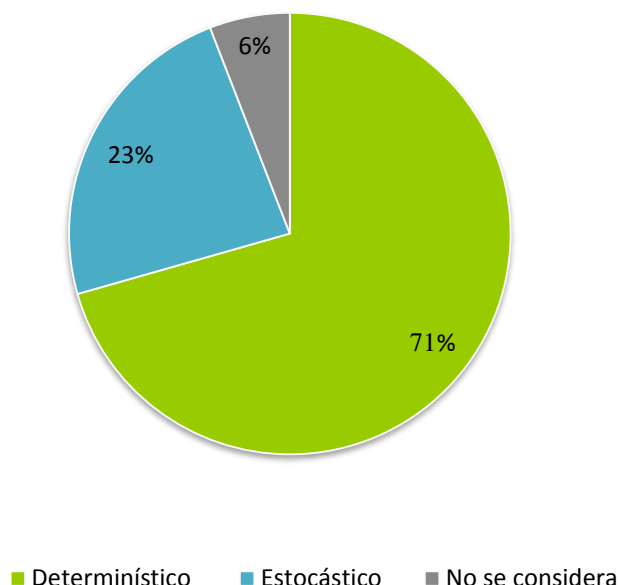


Ilustración 2 Clasificación de Publicaciones – Comportamiento de la demanda.

El lead time o el tiempo de espera de una orden es el tercer factor a caracterizar dentro del estado del arte realizado, dado que constituye un factor de gran importancia en la gestión de la cadena de suministro, puesto que de este se deriva el tiempo en el que se debe realizar las ordenes de requisición para disponer de los recursos necesarios en la producción. El lead time cuenta con características de carácter variable gracias a los múltiples componentes que inciden en este factor, tales como transporte, procesos, pagos, disponibilidad, cantidad de demanda, entre otros.

Dentro de la revisión bibliográfica que se desarrolló se pudo evidenciar que este factor no era incidente en el 32% de los documentos citados, lo cual resta exactitud a los modelos desarrollados por estos autores. Por otra parte, como se muestra en la Ilustración 3, el 21% de los mismos considera con valor constante este factor y tan solo el 47% de las publicaciones encontradas consideraron con características variables este factor. Dejando de esta manera un espacio para desarrollar metodologías que propongan soluciones con la consideración de este factor, en entornos compuestos por múltiples productos y demanda estocástica – probabilística.

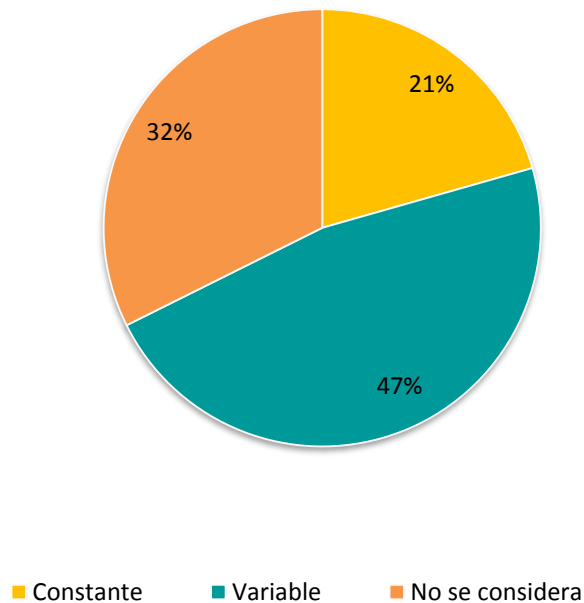


Ilustración 3 Clasificación de Publicaciones – Comportamiento del Lead Time.

Como se ha descrito anteriormente, la demanda y el lead time son factores de gran importancia en la consideración del modelo a plantear. Para ello, se realizó la discriminación de la matemática que se implementó en cada propuesta presentada por los autores citados. Dicha matemática le suma una característica de carácter discreto o continuo a la solución del modelo.

En la Ilustración 4 se evidencia el tipo de modelo matemático desarrollado por los autores citados, lo cual muestra que el 12% los mismos implementan ecuaciones algebraicas para incluir los factores que están entorno a la gestión de inventarios. Por otra parte, el 3% de la totalidad de las referencias refiere a la implementación de ecuaciones diferenciales para presentar una respuesta. De igual forma otro 3% de estos desarrollan los modelos basándose en la función de transformada Laplace que le da característica continua a la solución. De manera contraria el 21% de los modelos utilizan la transformada Z para establecer soluciones de característica discreta en las metodologías planteadas, el 9% de los autores relacionan su respuesta a las ecuaciones de diferencia y finalmente el 52% conformando la mayoría los documentos emplean espacios de estado para su método de solución.

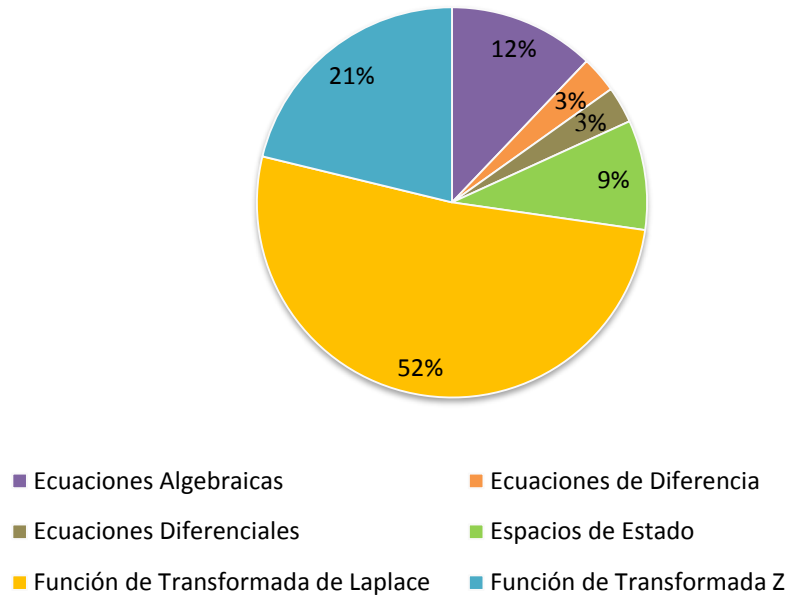


Ilustración 4 Clasificación de Publicaciones - Matemática del Modelo.

De esta revisión de literatura se derivan los siguientes resultados:

- Se han desarrollado pocas investigaciones en donde se considere el establecimiento de una política de inventarios con base en la teoría clásica de control predictivo para empresas multi-producto.
- Se han desarrollado pocos modelos que consideren el comportamiento estocástico de la demanda para el establecimiento de un pronóstico de la misma en el mercado.
- La mayoría de las investigaciones no consideraron el lead time como un factor influyente en el modelo de solución en la gestión de inventarios, el porcentaje que lo hizo asumió en su gran mayoría con un valor constante.
- La matemática implementada en los modelos para soluciones discretas referencia pocos avances de investigación.

## 2.5. Análisis de brechas

Los hallazgos en el estado del arte delimitaron el área de trabajo y en consecuencia permitieron la identificación de la brecha investigativa en la cual se debe enfocar el aporte de esta investigación. Con base en este análisis, se propone en este documento el desarrollo de una metodología de solución a la problemática planteada, basada en estrategias de control predictivo, enfocada a la reducción de costos de inventarios en procesos con dinámicas de abastecimiento variables, para un sistema con las siguientes características: sistema multi-producto, lead time variable y demanda estocástica.

### 3. METODOLOGIA

Para abordar el problema planteado anteriormente es necesario integrar dos áreas del conocimiento de la ingeniería, las cuales corresponden a la investigación de operaciones (gestión de inventarios) y la teoría de control de procesos. En esta sección se detallarán los pasos metodológicos seguidos durante esta investigación, los cuales se muestran a continuación:

#### A. Caracterización y análisis del estado del arte y marco teórico

Con el fin de establecer la línea base del manejo actual del control de inventario e identificar los enfoques de las investigaciones que han trabajado en resolver la problemática anteriormente descrita, se desarrolló una revisión bibliográfica del control de inventarios en tres ámbitos: gestión de inventarios, aplicaciones de la teoría de control de procesos en el sector industrial y aplicación de la teoría de control de procesos a la gestión de inventarios. Una vez identificadas las fortalezas y aportes de estas investigaciones previas, se procede a identificar posibles áreas de oportunidad de investigación, entre los cuales se destaca el enfoque propuesto en este documento.

#### B. Construcción de un modelo dinámico de procesos

Implementar una política de control de inventarios con el objetivo de minimizar los costos de producción implica poder establecer la relación existente entre las variables manipuladas y controladas del proceso, por lo cual es necesario desarrollar un modelo y/o simulación que permita emular el comportamiento del mismo. Teniendo en cuenta lo anterior, se han establecido los parámetros del modelo dinámico de proceso que comprenden las siguientes características: sistema multi-producto, lead time variable, demanda estocástica, análisis de costos e implementación de estrategias de control predictivo, para sistemas job shop y sistemas flexible flow shop. Este modelo se desarrolla con el fin de describir el comportamiento dinámico de todas las etapas productivas del sistema.

#### C. Diseño e implementación de la estrategia de control clásico

A partir del modelo dinámico del proceso que se ha desarrollado, se desarrolló para cada variable de almacenamiento una estrategia de control por retroalimentación, basada en las leyes del control clásico, con controladores tipo PID. Esta estrategia procura mantener cada nivel de inventario en un valor de referencia, proporcionando una herramienta de control individual asociada a las variables del proceso.

#### D. Diseño e implementación de la estrategia de control predictivo

Con base en las características del proceso, se seleccionó dentro de las leyes de control predictivo la estrategia DMC (Dynamic matrix control) como base para el desarrollo de la política de control de inventarios. Esta estrategia brinda las herramientas y flexibilidad

requeridos para ajustarse y responder de manera oportuna a la variabilidad, incertidumbre, y altas interacciones entre las distintas variables de un mercado estocástico, minimizando los costos asociados a los niveles de inventario en el proceso, gracias al comportamiento robusto de su estrategia predictivo.

#### E. Evaluación de la estrategia de control predictivo seleccionada

Se evaluará el desempeño de la estrategia propuesta basada en el algoritmo de control predictivo DMC. Dicha evaluación se hará mediante indicadores de desempeño, el primero de ellos es la sumatoria de la integral del valor absoluto del error (IAE) para cada lazo y los costos de almacenamiento asociados al sistema. Se comparará el desempeño de los sistemas job shop y flexible flow shop frente a las estrategias DMC y PID, esta comparación será llevada a cabo bajo el mismo escenario de simulación. Adicionalmente, se realizará un diseño de experimentos que permita la identificación de los factores significativos en los sistemas y la relación entre los mismo con las estrategias implementadas.

## 4. CONTEXTUALIZACIÓN DEL ENFOQUE PROPUESTO

La implementación de una política de inventarios es un proceso complejo, el cual requiere de respuestas precisas a preguntas claves como: ¿Cuándo y cuánto producir? o ¿Cuándo, en que cantidad y a quién solicitar los requerimientos de los productos?, con el fin de amortiguar los cambios dinámicos de la demanda de materia prima y productos terminados. La problemática es similar a la desarrollada en el campo de la automatización industrial para el control de un sistema de almacenamiento de fluido en estado continuo, donde el inventario es equivalente a la cantidad de fluido almacenado y la dinámica de este hace referencia a un balance de masa, como se muestra en la Ilustración 5.

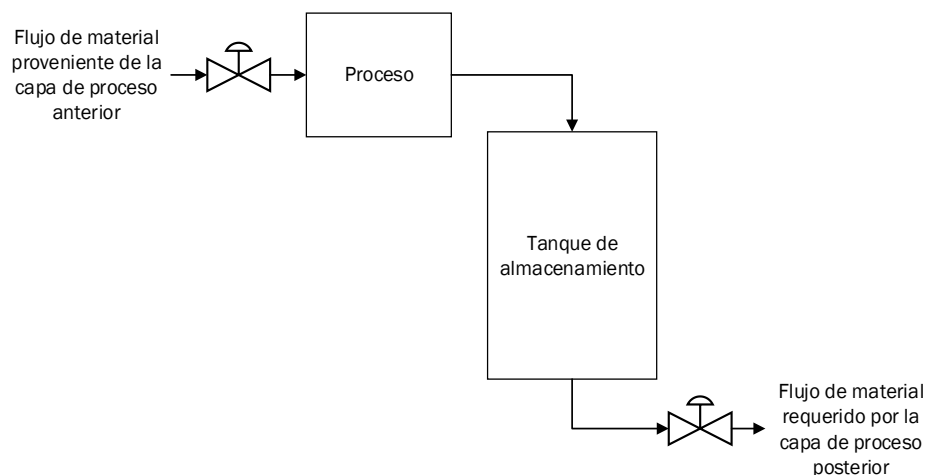


Ilustración 5 Sistema de almacenamiento.

Partiendo de esta analogía, el presente documento considera la implementación de las herramientas asociadas a la automatización de procesos industriales como base para el desarrollo de políticas de control de inventarios que generen y permitan una gestión óptima del mismo y una mejora considerable en la productividad de las industrias manufactureras.

## 4.1. Conceptos fundamentales

A continuación, se exponen los conceptos fundamentales aplicados en el desarrollo de la metodología enfocada a reducción de costos de inventarios, la cual es objeto de esta investigación.

### 4.1.1. Representación de modelos dinámicos de procesos

Los modelos dinámicos de procesos permiten representar el comportamiento del sistema de procesamiento físico real, basándose en el desarrollo de la descripción en tiempo lineal del sistema con conjuntos de ecuaciones diferenciales [40]. Las ecuaciones diferenciales son expresiones que al relacionarse con las entradas del sistema dan como resultado la transformada de la función de salida del proceso, convirtiéndose así en una herramienta útil para la representación y análisis del comportamiento dinámico de un sistema [26].

El proceso que es desarrollado en esta investigación sigue la representación matemática de ecuaciones diferenciales, basándose en la analogía descrita en la introducción de este capítulo para cada tipo de inventario.

El balance de masa que describe la dinámica de los inventarios se muestra en la ecuación (1).

$$\text{Flujo de masa que entra al proceso } (f_i) \quad - \quad \text{Flujo de masa que sale del proceso } (f_o) \quad = \quad \text{Tasa de acumulación de masa en el proceso } (f^A)$$

$$f_i(t) - f_o(t) = \frac{d}{dt} f^A \quad (1)$$

Esta representación describe de manera general la dinámica del comportamiento en cada uno de los componentes del sistema que se esté representando, facilitando el control de cada una de las variables del proceso.

#### 4.1.2. Teoría clásica de control de procesos – Estrategias PID

El control automático de procesos es un campo importante de la ingeniería, con el cual se busca obtener mejores productos y servicios para satisfacer las necesidades de un cliente. Tres operaciones básicas deben realizarse para implementar este tipo de estrategia de control. En primer lugar, se debe **medir** la variable que se desea controlar (M). Esta actividad es realizada con la combinación sensor/transmisor, la cual se encarga de generar una señal asociada a la variable de proceso medida. Dicha señal es recibida por el controlador, el cual la compara con el valor deseado de la variable y con base en dicha comparación **decide** (D) qué acciones correctivas tomar para mantener a la variable en su valor deseado. Con base en esta decisión, se emite una señal al elemento final de control para que **actúe** (A) sobre el proceso y afecte a la variable controlada. Estas tres operaciones, M, D y A, están siempre presentes en cualquier tipo de sistema de control, es imperativo que estén en lazo cerrado. Es decir, sobre la base de la medición se toma una decisión, y sobre la base de esta decisión se ejecuta una acción. Las medidas adoptadas deben regresar y afectar a la medición; de lo contrario, se estaría cometiendo un error importante en el diseño, ya que habría retroalimentación, y no se logrará control [26].

El tipo de controlador por retroalimentación más frecuentemente utilizado a nivel industrial es el tipo PID, debido a su simplicidad y a que ha demostrado ser eficiente para satisfacer la mayoría de los requerimientos de las plantas industriales. Dentro de esta familia de controladores, existen tres modos de control comúnmente implementados: el modo proporcional (P), el modo integral (I) y el modo derivativo (D). El controlador proporcional es el tipo de controlador más sencillo dentro de esta familia [26]. La ecuación (2) describe su operación.

$$m(t) = \bar{m} + K_c e(t) \quad (2)$$

Donde  $m(t)$  es la señal de salida del controlador,  $K_c$  es la ganancia del mismo y  $e(t)$  es el error del lazo de control (definido como la diferencia algebraica entre el valor deseado y la variable controlada). La ecuación anterior muestra que la señal de salida del controlador es proporcional al error, siendo la ganancia del controlador la constante de proporcionalidad. Este tipo de controladores tienen como desventaja que para obtener un cambio en la señal de salida del controlador es necesario que haya error en estado estable (conocido como offset). La mayoría de los procesos no toleran la presencia de offset. Para este tipo de procesos debe incorporarse una cantidad adicional de compensación al controlador proporcional. Esta compensación extra la da el modo integral del controlador. Por consiguiente, el controlador se vuelve un controlador proporcional-integral (PI) [26]. La ecuación (3) describe a este tipo de controladores.

$$m(t) = \bar{m} + K_c e(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int e(t) dt \quad (3)$$

Donde  $\tau_I$  se conoce como el tiempo integral del controlador. Este parámetro y la ganancia proporcional deben ajustarse (sintonizarse) para obtener una respuesta deseable del controlador. Finalmente, en ocasiones se agrega otro modo de control al controlador PI. Este nuevo modo es la acción derivativa; dando como resultado la configuración general del controlador PID. El objetivo de este modo es anticipar hacia donde se dirige el proceso utilizando la derivada del error como indicador [26]. La ecuación (4) describe a este tipo de controladores.

$$m(t) = \bar{m} + K_c e(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int e(t) dt + K_c \tau_D \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

Donde  $\tau_D$  se conoce como el tiempo derivativo del controlador. Este parámetro, el tiempo integral y la ganancia proporcional deben ajustarse (sintonizarse) para obtener una respuesta deseable del controlador. Este parámetro, al igual que el tiempo integral, suelen establecerse en minutos. Para llevar a cabo la sintonía de controladores existen diversos métodos, e.g. QDR, Mínimo IAE,  $\lambda$ -tuning, etc. [26].

A partir de este enfoque de la teoría clásica de control se desarrolla la segunda estrategia de control de proceso para esta investigación, utilizando lazos de control por retroalimentación (con PIDs) para cada capa del proceso.

#### 4.1.3. Control dinámico matricial - DMC

El control dinámico matricial (DMC) es un algoritmo de control de tiempo discreto que, al igual que el PID, se basa en identificación dinámica del proceso con pruebas de paso escalón bajo la presunción de linealidad, y también requiere retroalimentación. Sin embargo, DMC usa un modelo dinámico explícito del proceso (basado en datos), en lugar de usar modelos basados en funciones de transferencia o ecuaciones diferenciales. Además, DMC permite llevar a cabo estrategias de control para procesos con múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) con un solo controlador, mientras que si se quiere implementar una estrategia basada en PID se requiere de tantos controladores como variables controladas se tengan, puesto que los controladores PID están diseñados sólo para un lazo con una entrada y una salida (SISO).

DMC está soportado en el principio de superposición, es decir, si se han identificado las características dinámicas de un proceso (embebidas en su modelo explícito) y se conoce el cambio que se desea en la variable controlada, se puede estimar la salida del controlador que genere este cambio. De manera similar, si se conoce el efecto de una



perturbación en la variable del proceso se puede calcular la salida del controlador que anule el efecto de esta [41]. Estos cálculos se basan en predicciones realizadas por el algoritmo DMC para la variable controlada y la señal de controlador requerida en ventanas de tiempo cuyas dimensiones son conocidas como el horizonte de predicción (PH) y el horizonte de control (CH) respectivamente.

El modelo del proceso que utiliza este tipo de controladores se obtiene a partir de la respuesta escalón del sistema estudiado. Este tipo de controlador toma acciones discretas sobre la variable manipulada. En la Ilustración 6 se muestra un ejemplo del procedimiento de identificación dinámica con paso escalón para un proceso MIMO ( $2 \times 2$ ).

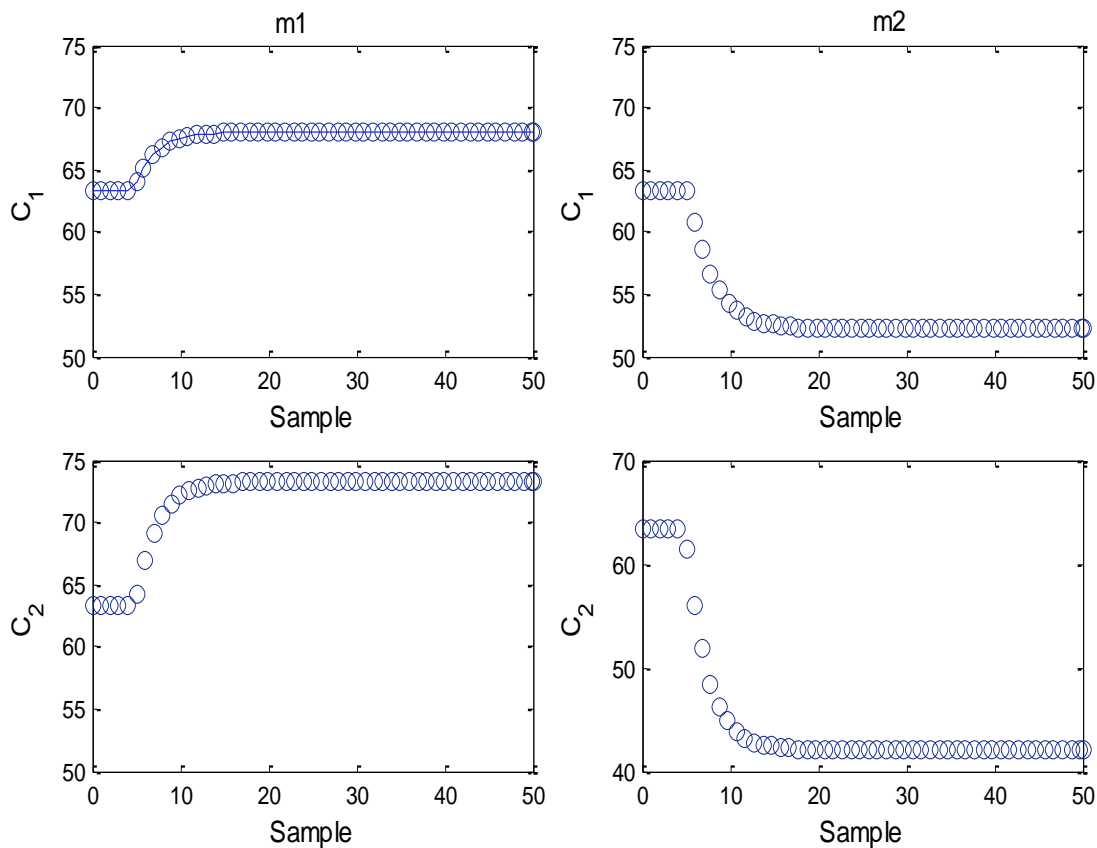


Ilustración 6 Respuesta escalón.

Basándose en los resultados de la prueba de paso escalón, se construye una matriz “A” para cada pareja de variables controlada-manipulada en la que se represente la respuesta del sistema por unidad de señal del controlador, tal como se muestra en la ecuación (5).

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & \dots & 0 \\ a_2 & a_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{ph} & a_{ph-1} & \dots & a_{ph-ch+1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Donde  $a_i = \frac{\bar{c} - c_i}{\Delta m}$ ,  $\bar{c}$  es el valor en estado estable de la variable controlada,  $c_i$  es el valor de la variable controlada en el instante de muestreo  $i$  y  $\Delta m$  es el cambio del paso escalón en la señal de salida del controlador.

Se deben concatenar las matrices construidas para cada pareja de entrada-salida en una matriz  $\mathcal{A}$ , como se muestra en la ecuación (6).

$$\mathcal{A} = \begin{bmatrix} A_1^1 & A_1^2 \\ A_2^1 & A_2^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Donde  $A_i^j$  es la matriz construida para el par  $c_i - m_j$ . Se definen los vectores de señal de controlador y error, respetivamente, como sigue en las ecuaciones (7) y (8):

$$\Delta M = [\Delta m_{1,1} \quad \Delta m_{1,2} \quad \dots \quad \Delta m_{1,n_c} \quad \Delta m_{2,1} \quad \Delta m_{2,2} \quad \dots \quad \Delta m_{2,ch}]^T \quad (7)$$

$$\mathbf{e} = [e_{1,1} \quad e_{1,2} \quad \dots \quad e_{1,p} \quad e_{2,1} \quad e_{2,2} \quad \dots \quad e_{2,ph}]^T \quad (8)$$

El producto de la matriz  $A$  por un producto cualquiera  $\Delta M$  va a dar el  $\Delta C$ , es decir, el cambio esperado o predicho en la variable esperada, en un escenario de control en cada iteración el valor deseado de  $\Delta C$  es el error  $\mathbf{e}$  predicho. El cambio requerido en la señal del controlador  $\Delta C$ , permite compensar el error  $\mathbf{e}$  o el valor de la perturbación que se predijo [41]. Esto se representa en la ecuación (9).

$$\mathcal{A} \Delta M = \mathbf{e} \quad (9)$$

De esta representación matemática resulta un sistema de ecuaciones con solución vacía, es decir no es posible establecer un valor de " $\Delta M$ " que anule la desviación completamente. Esto obliga a introducir un vector de residuales ( $\mathbf{r}$ ) para poder satisfacer la ecuación (10).

$$\mathcal{A} \Delta M = \mathbf{e} + \mathbf{r} \quad (10)$$

Por lo tanto, esta teoría se enfoca en minimizar el residuo, de manera que el resultado de la superposición sea lo más cercano a cero. Para esto se debe encontrar una solución para  $\Delta M$  que minimice  $r$ , o lo que es equivalente, a minimizar la suma del cuadrado de los residuos  $r^T r$  [41], como se muestra en la ecuación (11).

$$\Delta M = (\mathcal{A}^T \mathcal{A})^{-1} \mathcal{A}^T e \quad (11)$$

Con el fin de moderar la agresividad en la variación de las variables manipuladas, se introduce un parámetro de supresión  $\lambda$  para cada sub-matriz  $A$  de la matriz  $\mathcal{A}$ , multiplicado por una matriz identidad  $I \in \mathbb{R}^{ch \times ch}$ . En caso de que sea establecido un único valor de  $\lambda$ , la función referente a la ley de control se expone en la ecuación (12).

$$\Delta M = (\mathcal{A}^T \mathcal{A} + \lambda^2 I)^{-1} \mathcal{A}^T e \quad (12)$$

Esta estrategia de control requiere retroalimentación, la cual viene implícita en el error  $e$  que aparece en la ecuación (10). Para el cálculo de este error, el algoritmo DMC realiza una predicción de los valores de las señales  $c_i$  para una ventana de tiempo cuya dimensión es el horizonte de predicción, como se muestra en la ecuación (13).

$$\mathbf{c}_{pred}(k+1) = \mathbf{c}_{preduc}(k) + A \times \Delta M \quad (13)$$

Donde  $\mathbf{c}_{preduc}(k)$  (actualizado y corregido) corresponde al valor de  $\mathbf{c}_{pred}$  en la iteración previa, corregido con el error de modelaje  $\mathbf{e}_m(k)$ , el cual es, a su vez, la diferencia entre  $\mathbf{c}(k)$  y  $\mathbf{c}_{pred}(k)$ . Los sistemas dinámicos de inventarios, sin embargo, son procesos de naturaleza integrante, Gupta [42] sugiere una adecuación en el algoritmo DMC para su implementación en este tipo de proceso. El primer cambio sugerido hace referencia a un cambio en el cálculo del valor “ $\mathbf{c}$ ” predicho. Se muestra en las ecuaciones (14) y (15) el cálculo propuesto por Gupta, donde  $t_s$  hace referencia a el tiempo de muestreo.

$$c_{pred}(t + i t_s) = c(t) + i[c(t) - c(t - t_s)], \quad i = 1, 2, \dots, ph \quad (14)$$

$$\mathbf{c}_{pred} = [c_{pred}(t + t_s) \quad c_{pred}(t + 2 t_s) \quad \dots \quad c_{pred}(t + ph t_s)] \quad (15)$$

Este valor de  $\mathbf{c}_{pred}$  se usa de manera directa en el cálculo del error, prescindiendo del ajuste a la predicción con el error de modelaje. Adicionalmente, el autor recomienda agregar un factor de supresión “ $f$ ” que multiplique la diagonal de la relación  $A^T A$  para suavizar la reacción del controlador. A partir de este enfoque modificado del algoritmo DMC, se desarrolla la estrategia de control de proceso para esta investigación.

## 4.2. Caracterización de los sistemas

El desarrollo de esta investigación plantea la evaluación de estrategias de control clásicas (PID) y avanzadas (DMC) en dos sistemas de proceso definidos (Job Shop y Flexible Flow Shop). Dichos procesos son de naturaleza integrante, referentes a un sistema multi-producto con “i” referencias, dinámica de abastecimiento variable de materia prima “j” y múltiples capas “s” de procesos productivos asociadas a productos en proceso ( $V_s$ ). Las características de estos procesos son descritas en este segmento.

### 4.2.1. Sistema tipo taller de producción intermitente o Job Shop

Los sistemas tipo taller de producción intermitente o job shop (JS) refieren a sistemas de producción multi-variable secuencial predeterminada, es decir, a procesos productivos en donde al menos una referencia “i” cuenta con una secuencia operativa diferente [43]. Un ejemplo representativo de este tipo de sistemas es expuesto en la *Ilustración 7*, en donde el producto terminado 1 está señalado en color morado y el producto en proceso 2 en color azul.

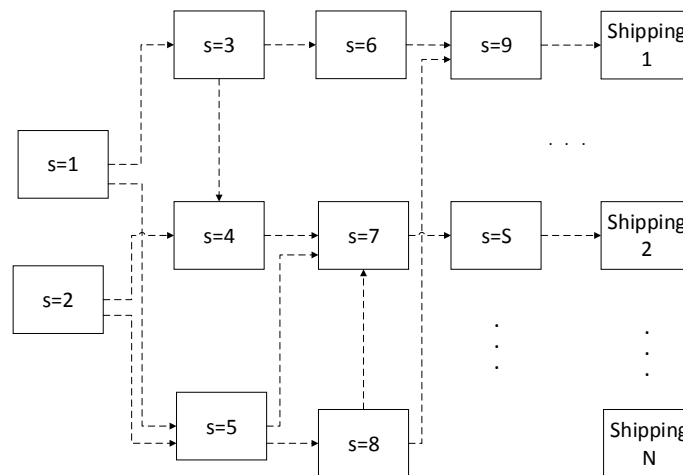


Ilustración 7 Sistema de producción tipo taller genérico.

Este tipo de procesos cuenta con múltiples capas de proceso, las cuales están conformadas por un único recurso de procesamiento con características similares o diferentes [44]. Estas capas de proceso están asociadas a la secuencia productiva de los productos terminados.

### 4.2.2. Sistemas tipo taller flexible de producción continuo o flexible flow shop

Los sistemas tipo taller flexible de producción continua hacen referencia a un sistema de producción continua de carácter secuencial [45]. Estos sistemas son caracterizados por procesar en el mismo orden todas las tareas, las cuales a su vez requieren de la totalidad de estaciones o capas “s” del sistema. La representación de este tipo de sistemas es expuesta en la Ilustración 8.

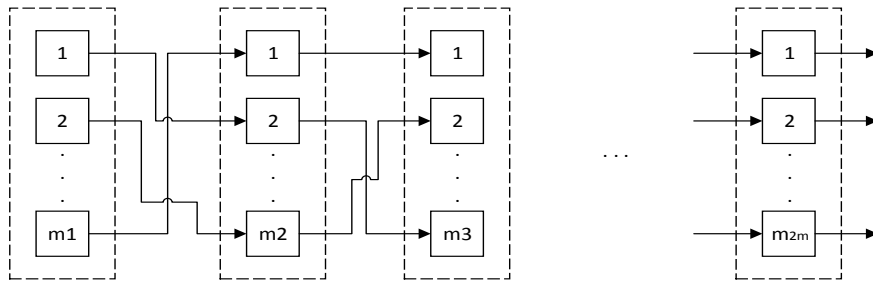


Ilustración 8 Sistema flexible de manufactura genérico.

Cada capa del proceso está conformada por múltiples recursos de procesamiento “m”, los cuales pueden contar con características similares o diferentes, motivo por el cual se debe establecer la secuencia de procesamiento y asignación de tareas a cada recurso dentro de cada estación del sistema. Para este fin, la literatura propone alternativas como: reglas de despacho, variantes de la heurística cuello de botella, métodos de ramificación y acotamiento, heurísticas de programación dinámica, recocido simulado, búsqueda Tabú, algoritmos genéticos, colonia de hormigas, redes neuronales [44]. En esta investigación se partirá de un supuesto que establece características idénticas para todos los recursos “m” que conforman una capa “s” del sistema. A partir del cual se establece una política de asignación, que determina las tareas que deben ser procesadas por cada recurso según la disponibilidad del mismo. El método de secuencia de procesamiento sigue la heurística de programación descrita en la sección 4.4.

#### 4.2.3.Demanda

El comportamiento dinámico del mercado dificulta la descripción precisa de la demanda debido a los múltiples factores que pueden intervenir en la misma. Para el desarrollo de esta investigación se contemplan 3 patrones en la demanda, que se exponen en la *Ilustración 9*, *Ilustración 10* y *Ilustración 11*.

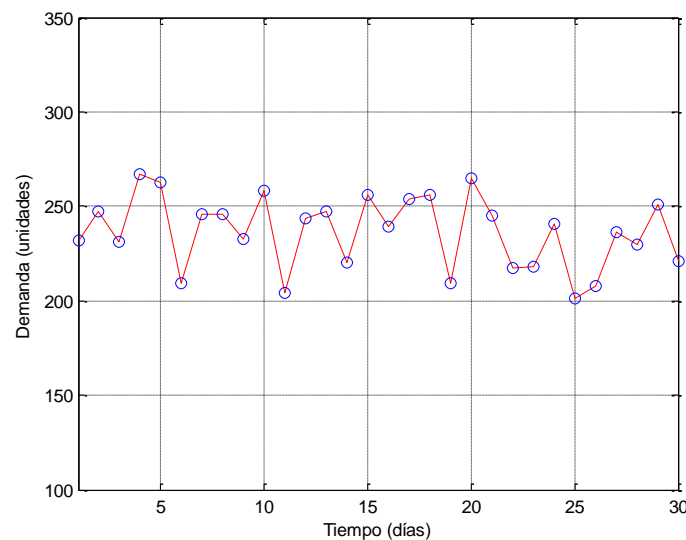


Ilustración 9 Patrón de demanda constante.

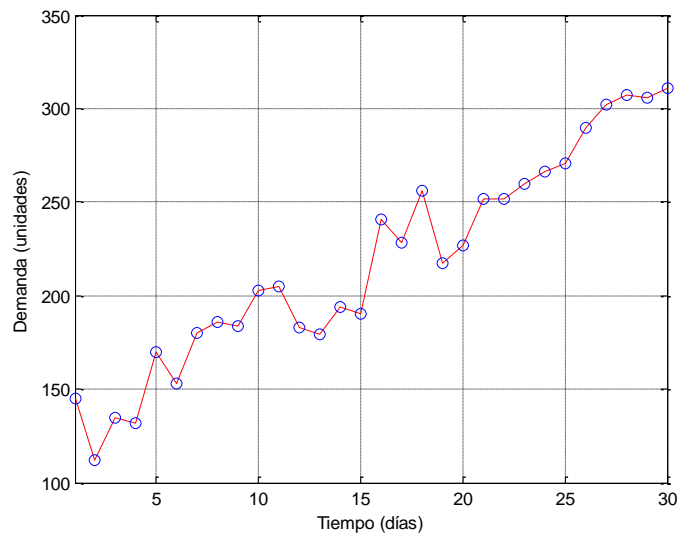


Ilustración 10 Patrón de demanda tendencial.

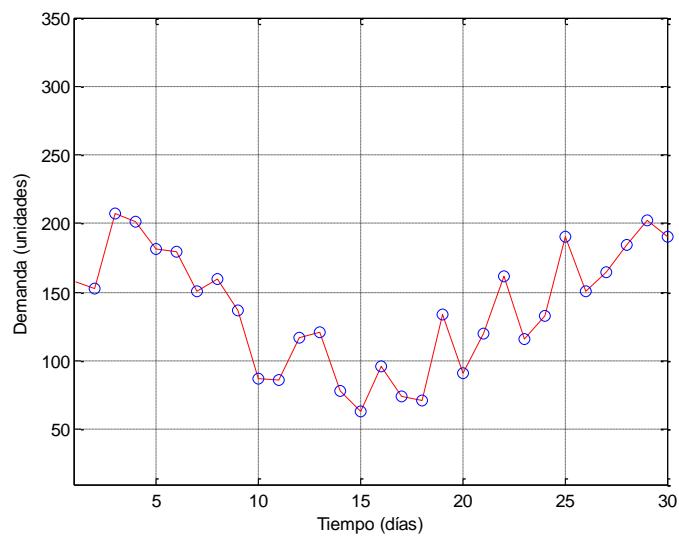


Ilustración 11 Patrón de demanda estacional.

Las funciones que describen cada patrón de demanda están descritas respectivamente por las ecuaciones (16) (17) y (18).

$$D(t) = c + e_t \quad (16)$$

$$D(t) = c_t + e_t \quad (17)$$

$$D(t) = A * \cos(c_t) + e_t \quad (18)$$

En donde “D” hace referencia al valor de la demanda, “c” a un valor constante, “t” al tiempo, “e” a un valor aleatorio asociado las fluctuaciones menores en el mercado. Los parámetros que conforman las funciones de demanda varían para cada tipo de producto terminado “i” en cada tiempo “t”, con el fin de describir el comportamiento dinámico del mercado. El valor de la demanda global por referencia “i” es igual a la sumatoria de las cantidades de producto terminado requeridas por pedido en un periodo. Adicionalmente, los valores de la demanda se les adicionará de manera aleatoria un valor de perturbación que será descrito por la función (19):

$$D(t) = A_n * U_{(t+t_n)} + e_t \quad (19)$$

La Ilustración 12 expone el comportamiento de la función (19), la cual es asociada a la perturbación del sistema.

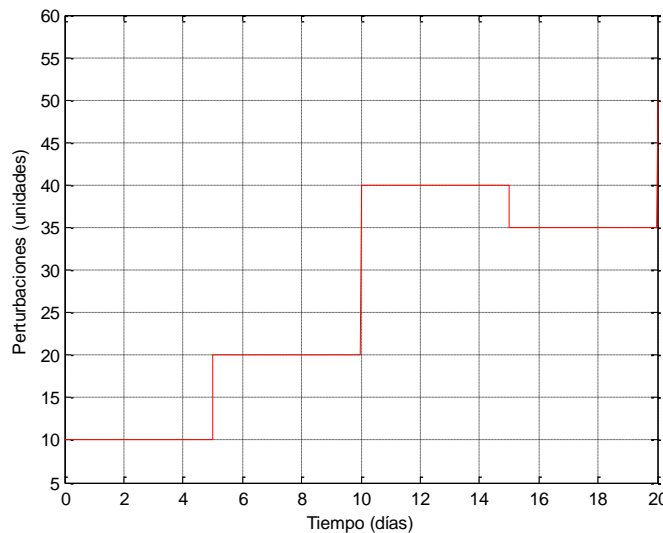


Ilustración 12 Perturbaciones de demanda en el sistema

La demanda es considerada como la perturbación del sistema productivo, este componente aleatorio le exigirá al controlador adaptarse a cambios no determinísticos. Se establecerán tres tipos de perturbación (P1, P2, P3), las cuales contarán con la misma estructura, pero con amplitudes diferentes.

#### 4.2.4. Pronósticos de demanda

El pronóstico de demanda está sujeto a metodologías independientes para cada patrón, para cada tipo de producto terminado y basándose en el histórico de datos del proceso. El método de pronóstico se muestra en la siguiente secuencia de pasos:

1. Los datos de demanda acumulados del proceso en el tiempo, son representados como se muestra en la ecuación (20).

$$H = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{21} & \dots & d_{t1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{1c} & d_{2c} & \dots & d_{tc} \end{bmatrix} \quad (20)$$

En donde la matriz “H” representa los valores históricos del sistema, “d” hace referencia a la demanda de producto terminado, que se encuentra discriminado por periodo “t” y ciclo “c”. Con base en esta información se determina el valor promedio global de los datos acumulados por periodo “ $D = \overline{d_{tc}}$ ”.

2. Determinar la regularidad de la demanda diaria, esto se logra mediante el establecimiento de la relación entre la demanda “ $d_{tc}$ ” y promedio global “D” de las mismas, como se muestra en la ilustración (21).

$$\begin{bmatrix} \frac{d_{11}}{D} & \frac{d_{21}}{D} & \dots & \frac{d_{t1}}{D} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{d_{1c}}{D} & \frac{d_{2c}}{D} & \dots & \frac{d_{tc}}{D} \end{bmatrix} \quad (21)$$

3. Dado que la demanda de los productos cuenta con comportamiento estacional en un horizonte de tiempo, se establece un factor por periodo “t” que determine la tendencia en cada ciclo “c”. Este factor al ser multiplicado por el promedio global de la demanda, permite pronosticar el comportamiento de la misma en próximo ciclo “c+1”, como se muestra en la ecuación (22).

$$\begin{bmatrix} \overline{d_{t1}} \\ \vdots \\ \overline{d_{tc}} \end{bmatrix} \times D = \begin{bmatrix} d_{t1} \\ \vdots \\ d_{tc} \end{bmatrix}_{c+1} \quad (22)$$

El resultado de este pronóstico es tomado como insumo del sistema para establecer la política de compra y producción en un horizonte de tiempo.

### 4.3. Tiempo de espera o lead time

El tiempo de espera o lead time hace referencia al tiempo transcurrido entre la generación de la orden de compra de un insumo y la entrega del mismo por parte del proveedor [43]. Este valor es influenciado por múltiples factores externos (ambientales,



sociales, políticos, entre otros), los cuales agregan incertidumbre al tiempo de abastecimiento de la producción, motivo por el cual se ha decidido representar mediante una distribución estocástica.

La distribución estocástica seleccionada es identificada como distribución triangular. Esta cuenta con características idóneas para simbolizar el comportamiento del tiempo de abastecimiento en un sistema productivo gracias a que sus parámetros de entrada pueden ser comparados con la información de tiempos mínimos, de moda y máximos de entrega de los productos, como se muestra en la Ilustración 13.

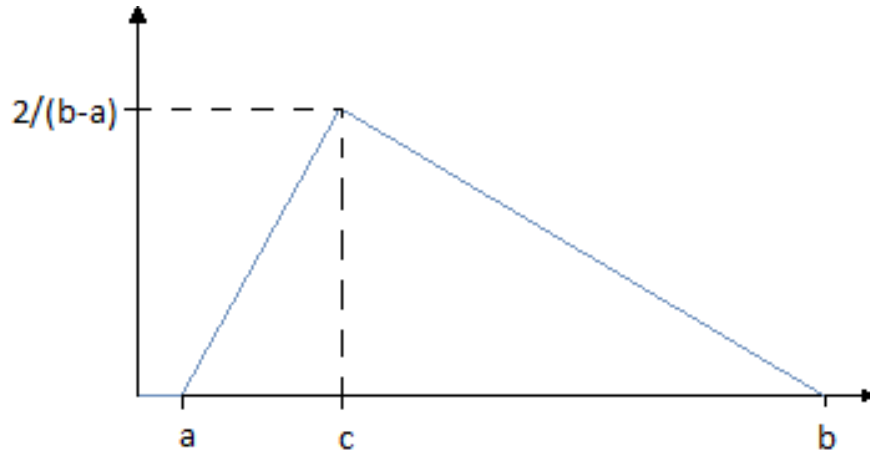


Ilustración 13 Distribución triangular.

En donde “a” en este caso hace referencia al tiempo mínimo de entrega, “b” al máximo y “c” al tiempo moda. La probabilidad de ocurrencia de estos eventos corresponde a la función (23):

$$f(x|a, b, c) = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)} & \text{cuando } a \leq x < c \\ \frac{2}{(b-a)} & \text{cuando } x = c \\ \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-c)} & \text{cuando } c < x \leq b \\ 0 & \text{otros casos} \end{array} \right\} \quad (23)$$

A partir de esta distribución se establece el tiempo de entrega de las tres materias primas “j” que comprenden los insumos del proceso, para cada requerimiento “i” en cada orden de compra.

#### 4.4. Programación de producción

La programación de producción o scheduling define la asignación de tareas a recursos en el tiempo de producción. Esta investigación plantea metodologías independientes en la programación de producción para cada estructura de proceso establecida en este documento. En el proceso Job Shop se establece una programación cuello de botella, mientras que en el proceso Flexible Flow Shop se implementa una metodología de cuello de botella híbrido para la programación de las máquinas en cada estación. Las metodologías y los requerimientos de las mismas se describen a continuación.

##### 4.4.1. Tiempo de entrega de productos o Due Date

El tiempo de entrega de productos terminados a los clientes o due date (*DD*) es información base para determinar una metodología de programación de producción que busque la minimización de faltantes y con esto la estimación del nivel servicio del sistema. Los tiempos de entrega se establecen mediante el cálculo del tiempo de procesamiento del lote a producir más la holgura asociada a los imprevistos del procesamiento, los pasos son descritos a continuación:

- a. Calcular el tamaño de lote para cada producto en proceso y materia prima para cumplir con la demanda, teniendo en cuenta el inventario de producto terminado, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$TL = \left( P * \left( \frac{nc}{100} + 1 \right) \right) - n + h \quad (24)$$

En donde *TL* es el tamaño del lote, *P* el pronóstico de requerimientos de producto en proceso o materia prima basado en la explosión de materiales, *nc* porcentaje aproximado de productos no conformes del proceso, *n* al nivel del tanque de almacenamiento de productos terminados y *h* a la holgura del sistema.

- b. Calcular el tiempo total de procesamiento para cada lote de producto en proceso y materia prima.
- c. Identificar el tiempo máximo de procesamiento por estación para cada lote de producción.
- d. Determinar el due date del pedido, mediante la suma de los tiempos máximos de procesamiento de los productos en proceso, materia prima y la holgura.

$$DD = \left( \sum \max \text{ tiempo} \right) + \text{holgura} \quad (25)$$

La holgura del sistema se establece como un porcentaje del tiempo de producción total.

#### 4.4.2. Metodología de programación de producción: Cuello de botella

La metodología de programación de producción cuello de botella es una heurística que tiene como objetivo establecer una secuencia de operación de tareas que minimice las tardanzas en los tiempos pactados de entrega [46]. La implementación de esta heurística parte de la construcción de un grafo del proceso Job Shop, en donde el valor de cada arco sea el tiempo de procesamiento total para fabricar el lote y los nodos especifique la máquina y el trabajo que sale del mismo respectivamente, como se muestra en la *Ilustración 14*.

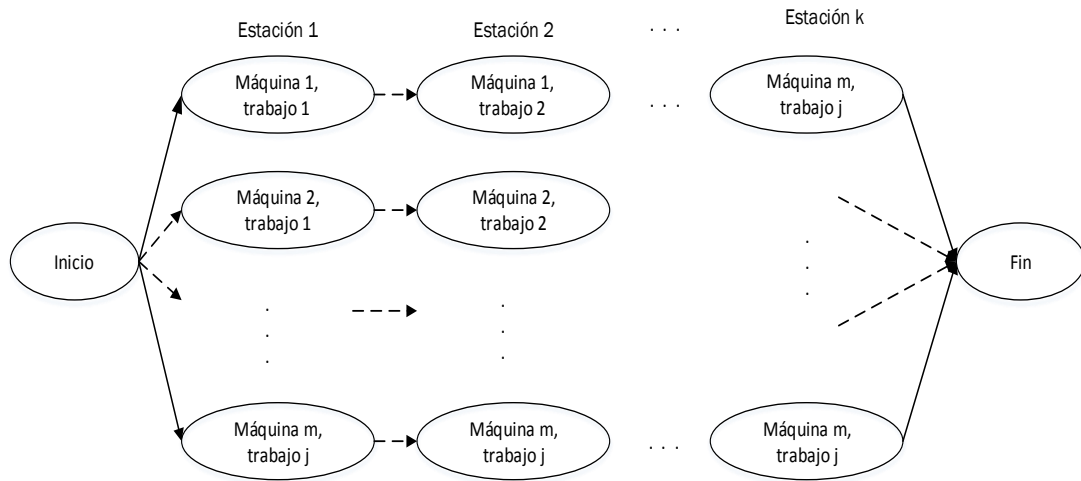


Ilustración 14 Grafo de proceso productivo.

- A partir del grafo se procede a calcular el  $C_{max}$  (camino más largo desde el nodo inicio hasta el nodo fin).
- Para cada máquina del sistema, se construye una tabla que relacione el tiempo de procesamiento  $p_{jv_s}$ , de liberación  $r_{jv_s}$  y entrega  $d_{jv_s}$  con cada lote de producto en proceso  $J$ . En donde:

- ✓  $P_{jv_s}$  es el tiempo de procesamiento
- ✓  $r_{jv_s}$  hace referencia al camino más largo del nodo inicio hasta el nodo que se está analizando.
- ✓  $d_{jv_s} = c_{max} -$  camino más largo desde el nodo que se está analizando hasta el nodo fin  $+ P_{jv_s}$ .

- c. Con base en estos cálculos, se evalúan diferentes combinaciones de secuencia de producción para seleccionar la secuencia de trabajos que minimice el máximo retraso de entrega. Esta selección parte del cálculo del retraso ( $L_j$ ) de cada lote de producción  $j$ , como se muestra en la ecuación (26).

$$L_j = c_j - d_j \quad (26)$$

- d. Para cada máquina, se establece el máximo retraso y se establece si este corresponde a una tardanza ( $T_j$ ) o adelantos ( $E_j$ ), lo establecido en la ecuación (27).

$$Si : \quad L_j > 0 \text{ entonces } T_j = L_j \quad (27)$$

$$Si no: \quad E_j = |L_j|$$

Cuando hay tardanzas el sistema de inventarios se ve impactado en los faltantes al mercado, mientras que cuando hay adelantos el costo de almacenamiento aumenta. La mejor secuencia será aquella con menor  $L_{max}$ .

- e. Con base en los  $L_{max}$  por máquina, se selecciona la máquina cuello de botella. Esta será aquella con mayor  $L_{max}$ . La secuencia de esta máquina se adiciona al grafo construido, agregando los arcos nuevos correspondientes a los valores de los tiempos de procesamiento. Además, esta máquina no se tendrá en cuenta en las siguientes iteraciones.
- f. Los pasos (b) hasta (e) se repiten hasta programar todas las maquinas del sistema.

#### 4.4.3. Metodología de programación de producción: Cuello de botella hibrido

La metodología de programación de producción cuello de botella puede ser modificada para establecer una secuencia de operación de tareas que minimice las tardanzas en los tiempos pactados de entrega, en un proceso Flexible Flow Shop [47]. La implementación de esta metodología modificada parte de los pasos establecidos en la sección 4.4.2, pero adiciona la programación de las máquinas  $m$  de capa  $v_s$  del proceso, dicha programación se basa en el cálculo del tiempo de terminación más cercano del lote  $j$  en la máquina  $m$  de la capa  $v_s$  ( $EC_{jmv_s}$ ), en donde:

$$EC_{jmv_s} = \max(r_{jv_s} + p_{jv_s}; d_{jv_s}) \quad (28)$$

Si se va seleccionar el primer lote de la máquina  $m$  en la capa  $v_s$ , en caso contrario, se calcula como se muestra en la ecuación (29).

$$EC_{jmv_s} = \max \left( \max \{ c_{LAST_{mv_s}}; r_{jk} \} + p_{jv_s}; d_{jv_s} \right) \quad (29)$$

Donde,  $c_{LAST_{mv_s}}$  es el tiempo de terminación del último lote procesado en la máquina  $m$  de la capa  $v_s$ . Con base en los resultados obtenidos, se selecciona el con menor  $EC_{jmv_s}$ . En caso de empate se selecciona el lote con menor tiempo de liberación. El lote seleccionado se asigna a la secuencia de producción de la máquina  $m$  de la capa  $v_s$ , es decir, esta secuencia se construye iterativamente.

## 4.5. Sensores

Como es descrito anteriormente, la problemática planteada se aborda de manera análoga a la presentada por un sistema de almacenamiento de fluido en estado continuo, donde el inventario es equivalente a la cantidad de fluido almacenado. Con base en esto, para determinar el comportamiento de la cantidad de inventario en un periodo de tiempo, es necesario contar un sensor de nivel que permita realizar las operaciones de medición en el tanque de almacenamiento [26].

Los sensores son representados a través de una función de transferencia de primer orden, como se muestra en la ecuación (30).

$$H(s) = \frac{C(s)}{PV(s)} = \frac{k_T}{\tau_T s + 1} \quad (30)$$

En donde “ $PV$ ” hace referencia a la variable controlada del proceso, “ $C$ ” a la señal emitida por el sensor, “ $k_T$ ” a la ganancia del sensor y “ $\tau_T$ ” a la constante de tiempo del sensor. La información suministrada por este equipo de medición es tratada como insumo para el controlador, el cual determinará la acción del actuador para llevar el sistema al valor deseado [26].

## 4.6. Actuadores

Los actuadores hacen referencia al elemento final de control que tiene como objetivo ejecutar la acción decidida por el controlador, la cual es definida con base en la información actual del sistema suministrada por el sensor como se mencionó anteriormente [26]. En el proceso se implementan válvulas automáticas como elementos finales de control en el proceso, las cuales son una analogía que representan al regulador de flujo en la línea de producto.

El tipo de válvula seleccionada es de característica lineal, es decir, permite un flujo directamente proporcional a la señal enviada a la válvula [26]. La ganancia que representa este comportamiento es descrita en la función (31).

$$k_v = \frac{df}{dm} \quad (31)$$

Esta ganancia permite establecer la función de transferencia que describe el comportamiento de las válvulas de control [26], como se muestra en la ecuación (32).

$$G_v(s) = \frac{k_v}{\tau_v s + 1} \quad (32)$$

En donde “ $\tau_v$ ” corresponde a la constante de tiempo de la válvula. Estos actuadores están incluidos en el proceso productivo para cada sistema de almacenamiento en las etapas del proceso.

#### 4.7. Política de gestión de inventarios

Basándose en las políticas reales de gestión de inventarios en el sector industrial, el marco en el cual opera el proceso productivo es un sistema híbrido push – pull el cual busca minimizar los niveles de inventario en cada etapa del proceso para proteger el sistema ante fluctuaciones de la demanda. La estructura de costos contempla la penalidad al incurrir en faltantes dentro de los pedidos, este valor es asociado a la cantidad y tipo de unidades faltantes. Adicionalmente relaciona los costos de inventario en cada una de las etapas “s” del proceso y el valor asociado a las órdenes de compra.

La minimización de costos será lograda mediante la implementación de teorías de control de procesos que controlan el nivel de inventario en cada etapa del proceso, en pro de dar cumplimiento a la demanda, con el nivel menor de inventario posible.

#### 4.8. Supuestos

Los siguientes supuestos son considerados para la formulación del problema:

- Cada materia prima “j” será adquirida mediante un proveedor diferente, los cuales tienen tiempos de espera independientes con parámetros diferentes.
- No se aceptan entregas parciales de materia prima.
- Los tanques de almacenamiento cuentan con capacidad finita y son individuales para cada materia prima, cada producto en proceso y cada producto terminado.
- No se tendrán en cuenta los tiempos de alistamiento.
- No se aceptarán reprocesos en el sistema.
- La programación se realizará con base en pedidos.

## 5. MODELO MATEMÁTICO PARA CONTROL DE COSTOS DE INVENTARIOS

La notación utilizada para la formulación del problema se define, como sigue:

### Parámetros:

- $s =$  Número de capas en el proceso  $s = 1, 2, \dots, S$ .
- $t =$  Tiempo.  $t = 1, 2, \dots, T$ .
- $i =$  Tipo de producto terminado.  $i = 1, 2, \dots, i$ .
- $v =$  Tipo de producto en proceso  $v = 1, 2, \dots, V$ .
- $v_s =$  Sub set de producto en proceso  $v$  asociado a la capa  $s$ .
- $j =$  Tipo de materia prima.  $j = 1, 2, \dots, J$ .
- $p_{it} =$  Pedido del producto  $i$  en el tiempo  $t$ .  $p_{it} = 1, 2, \dots, P_{it}$ .
- $M_{it} =$  Costo asociado al costo de penalidad por faltantes de producto terminado  $i$ , en el tiempo  $t$ .
- $n_p =$  Tiempo de entrega pactado del pedido  $p_{it}$ .
- $H_{pit} =$  Sub set de pedidos  $p_i$  asociados al tiempo  $t$ .
- $C_{it} =$  Costo de almacenamiento por unidad de producto terminado  $i$  en el tiempo  $t$ .
- $C_{vst} =$  Costo de almacenamiento por unidad de producto en proceso  $v_s$  en el periodo  $t$ .
- $C_{jt} =$  Costo de almacenamiento por unidad de materia prima  $j$  en el tiempo  $t$ .
- $k_i =$  Capacidad máxima de almacenamiento de producto terminado  $i$ .
- $k_{v_s} =$  Capacidad máxima de almacenamiento de producto en proceso  $v_s$ .
- $k_j =$  Capacidad máxima de almacenamiento de materia prima  $j$ .
- $G_j =$  Punto de equilibrio para la economía en escala en la compra de materia prima  $j$ .
- $D_{it} =$  Demanda global del producto terminado  $i$  en el tiempo  $t$ .
- $CO_j =$  Costo de realizar un pedido de materia prima  $j$ .
- $Z_{v_s} =$  Tamaño del buffer de producto en proceso  $v_s$ .
- $R_s =$  Matriz de requerimientos de entradas para producir las salidas de la capa  $s$ .
- $C'_j =$  Costo de la materia prima  $j$  en cantidades  $\leq G_j$  unidades.
- $C''_j =$  Costo de la materia prima  $j$  en cantidades  $> G_j$  unidades.

Variables:

- $O_{jt}$  = Cantidad de órdenes de materia prima  $j$  en el tiempo  $t$ .
- $I_{jt}^R$  = Cantidad de materia prima  $j$  en inventario, en el tiempo  $t$ .
- $I_{v_s t}^W$  = Cantidad de producto en proceso  $v_s$  en inventario, en el tiempo  $t$ .
- $I_{it}^F$  = Cantidad de producto terminado  $i$  en inventario, en el tiempo  $t$ .
- $B_{jt}^R$  = Faltantes de materia prima  $j$  en inventario, en el tiempo  $t$ .
- $B_{v_s t}^W$  = Faltantes de producto en proceso  $v_s$  en inventario, en el tiempo  $t$ .
- $B_{it}^F$  = Faltantes de producto terminado  $i$  en inventario, en el tiempo  $t$ .
- $a_{jt}$  = Cantidad de materia prima  $j$  recibida como flujo en el tiempo  $t$ .
- $\Delta t^{Aj}$  = Tiempo transcurrido entre el tiempo  $t$  y el tiempo en el que inicio de recibo de la materia prima  $\Delta t^{Aj} = t_{\text{actual}} - t_{\text{inicial}}$
- $mp_j$  = Cantidad de materia prima  $j$  sacada del sistema como flujo en el tiempo  $t$ .
- $\Delta t^{mpj}$  = Tiempo transcurrido entre el tiempo  $t$  y el tiempo en el que inicio el envío del material  $\Delta t^{mpj} = t_{\text{actual}} - t_{\text{inicial}}$
- $pp_{v_s}$  = Cantidad de producto en proceso  $v_s$  sacada del sistema como flujo en el tiempo  $t$ .
- $\Delta t^{pp_{v_s}}$  = Tiempo transcurrido entre el tiempo  $t$  y el tiempo en el que inicio el envío del producto en proceso  $\Delta t^{pp_{v_s}} = t_{\text{actual}} - t_{\text{inicial}}$
- $E_s$  = Salida del proceso en la capa  $s$ .
- $l_{p_i n_p}$  = Cantidad de producto terminado  $i$  entregado al pedido  $p$  en el tiempo de entrega pactado  $n_p$ .
- $X_{jt} = \begin{cases} 1 & \text{Si la cantidad de materia prima } j \text{ a pedir en el tiempo } t \text{ es } \leq G_j \\ 0 & \text{Otro caso} \end{cases}$
- $Y_{jt} = \begin{cases} 1 & \text{Si la cantidad de materia prima } j \text{ a pedir en el tiempo } t \text{ es } > G_j \\ 0 & \text{Otro caso} \end{cases}$
- $Q_{it}$  = Cantidad de producto terminado  $i$  a producir en el tiempo  $t$ .



### Modelo matemático:

Función objetivo:

$$\text{Min} \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{j=1}^J \{ (O_{jt} * CO_j) + (I_{jt}^R * C_{jt}) + (X_{jt} * C'_{jt} * a_{jt}) + (Y_{jt} * C''_{jt} * a_{jt}) \} \right. \\ \left. + \sum_{v_s}^V (I_{v_s t}^W * C_{v_s t}) + \sum_i^i \{ (I_{it}^F * C_{it}) + (B_{it}^F * M_{it}) \} \right] \quad (33)$$

Sujeto a:

$$I_{jt}^R - B_{jt}^R = I_{jt-1}^R - B_{jt-1}^R + (A_{jt} * \Delta t^{A_j}) - (mp_j * \Delta t^{mp_j}) \quad \forall j, t \quad (34)$$

En donde  $E_{s:\text{actual}} = (mp_j * \Delta t^{mp_j})$

$$I_{v_s t}^W - B_{v_s t}^W = I_{v_s t-1}^W - B_{v_s t-1}^W + (E_{s-1} * R_s^{-1}) + (pp_{v_s} * \Delta t^{pp_{v_s}}) \\ \forall v_s, t; s = 2, 3, \dots, S. \quad (35)$$

En donde  $E_{s:\text{actual}} = (pp_{v_s} * \Delta t^{pp_{v_s}})$

$$I_{it}^F - B_{it}^F = I_{it-1}^F - B_{it-1}^F + (E_{s-1} * R_s^{-1}) - \sum_{H_{p_i t}} (l_{p_i n_p}) \quad \forall i, t \quad (36)$$

$$I_{jt}^R \leq K_j \quad \forall j, t \quad (37)$$

$$I_{v_s t}^W \leq K_{v_s} \quad \forall v_s, t \quad (38)$$

$$I_{it}^F \leq K_i \quad \forall i, t \quad (39)$$

$$I_{v_s t}^W \geq Z_{v_s} \quad \forall v_s, t \quad (40)$$

$$D_{it} + B_{it-1} - I_{it}^F \geq Q_{it} \quad \forall i, t \quad (41)$$

$$\sum_{H_{p_i t}} B_{p_i t}^F = B_{it}^F \quad \forall i, t \quad (42)$$

$$B_{p_i t}^F = p_{it} - l_{p_i n_p} \quad \forall i, t \quad (43)$$

$$\sum_{H_{p_i t}} p_{it} = D_{it} \quad \forall i, t \quad (44)$$

$$O_{jt}, I_{jt}^R, I_{v_s j}^W, I_{it}^F, B_{jt}^R, B_{v_s t}^W, B_{it}^F, l_{p_i n_p}, Q_{it}, a_{jt}, X_{jt}, Y_{jt} \geq 0 \quad (45)$$

La función objetivo del modelo matemático planteado es descrita en la ecuación (33). Dentro de la cual se evalúa los factores considerados como significativos en la estimación de costos de inventarios en un sistema productivo. El segmento  $(O_{jt} * CO_j)$  evalúa el costo de ordenar materias primas. El segmento  $(I_{jt}^R * C_{jt})$  determina el costo por almacenamiento de inventario de materias primas. Los segmentos:  $(X_{jt} * C'_{jt} * a_{jt})$  y  $(Y_{jt} * C''_{jt} * a_{jt})$  evalúan el costo de la materia prima según la cantidad de unidades de pedido. Estos segmentos son evaluados para cada materia prima “j” en cada tiempo “t”. Por otra parte, el segmento  $(I_{v_s t}^W * C_{v_s t})$  establece el costo por almacenamiento de inventario para cada tipo de productos en proceso “v<sub>s</sub>”, en cada tiempo “t”. Finalmente, el segmento  $(I_{it}^F * C_{it})$  determina el costo por almacenamiento de inventario de producto terminado y el segmento  $(B_{it}^F * M_{it})$  evalúa el costo asociado a la penalidad de los faltantes en producto terminado “i”, en el tiempo “t”.

Las restricciones que acompañan la función objetivo del modelo matemático, son expuestas en las ecuaciones comprendidas entre las ecuaciones (34) y la (45). La ecuación (34) establece el nivel de inventario de materia prima, mediante la interacción de las variables: inventarios  $(I_{jt-1}^R)$ , faltantes  $(B_{jt-1}^R)$ , unidades de entrada  $(A_{jt} * \Delta t^{A_j})$  y salida del sistema  $(mp_j * \Delta t^{mp_j})$ . Las ecuaciones (35) y (36), valoran el nivel de inventario bajo los mismos parámetros de los productos en proceso y productos terminados respectivamente.

Las restricciones establecidas en las ecuaciones (37), (38) y (39) aseguran que el valor del inventario no exceda la capacidad máxima de almacenamiento (K) para las materias primas “j”, los productos en proceso (v<sub>s</sub>) y los productos terminados (i) respectivamente. La restricción expuesta en la ecuación (40) determina un valor mínimo de inventario mediante la determinación de un buffer (Z<sub>v<sub>s</sub></sub>) para cada tipo de producto en proceso “v<sub>s</sub>”. La restricción mostrada en la ecuación (41) indica la cantidad de producto terminado que se debe producir en el tiempo “t”.

La restricción asociada a la ecuación (42) calcula el faltante total del producto terminado a partir de los faltantes de los pedidos individuales. La restricción presentada en la ecuación (43) determina el faltante por producto terminado “i” asociado a un pedido “p”. La restricción mostrada en la ecuación (44) establece la demanda global del producto terminado a partir de los pedidos individuales.

Finalmente, la restricción presentada en la ecuación (45) contempla todas las variables como valores mayores iguales a cero.

## 6. PROCESOS PRODUCTIVOS

El modelo matemático establecido en la sección 5 de este documento se establece como una de las herramientas para la evaluación del desempeño de las estrategias de control planteadas en esta investigación. La estructura genérica de los procesos en los que se evaluarán las estrategias de control fue descrita en los segmentos 4.4.2 y 4.4.3, en esta sección se establece la dinámica de funcionamiento de cada uno de los procesos, el dimensionamiento, capacidad productiva y la implementación de las estrategias de control en cada uno de estos.

### 6.1. Proceso productivo Job Shop

El proceso productivo Job Shop (JS) cuenta con capacidad de producción continua, correspondiente a un proceso multi-producto, el proceso comprende una serie de transformaciones de producto que son expresadas mediante explosiones de materia prima y productos en proceso, para la producción de una cantidad de producto terminado requerido. La proporción de estas explosiones son:

Materia prima ( $j = 1,2,3$ ) – Producto en proceso ( $v_s = 1,2$ )

	<i>Producto en proceso 1</i>	<i>Producto en proceso 2</i>
<i>Materia prima1</i>	3	1
<i>Materia Prima 2</i>	5	3
<i>Materia Prima 3</i>	0	2

Tabla 1 Explosión Materia prima ( $j=1,2,3$ ) - Producto en proceso ( $l=1,2$ )

Producto en proceso ( $v_s = 1,2$ ) – Producto en proceso ( $v_s = 3,4$ )

	<i>Producto en proceso 1</i>	<i>Producto en proceso 2</i>
<i>Producto en proceso 3</i>	3	2
<i>Producto en proceso 4</i>	1	3

Tabla 2 Producto en proceso ( $v_s=1,2$ ) – Producto en proceso ( $v_s=3,4$ )

Producto terminado ( $i = 1,2$ ) – Producto en proceso ( $v_s = 3,4$ )

	<i>Producto en proceso 3</i>	<i>Producto en proceso 4</i>
<i>Producto terminado 1</i>	1	3
<i>Producto terminado 2</i>	4	0

Tabla 3 Producto terminado ( $i=1,2$ ) – Producto en proceso ( $v_s=3,4$ )

La representación gráfica del proceso descrito se muestra en la Ilustración 15.

## Representación gráfica de proceso Job Shop

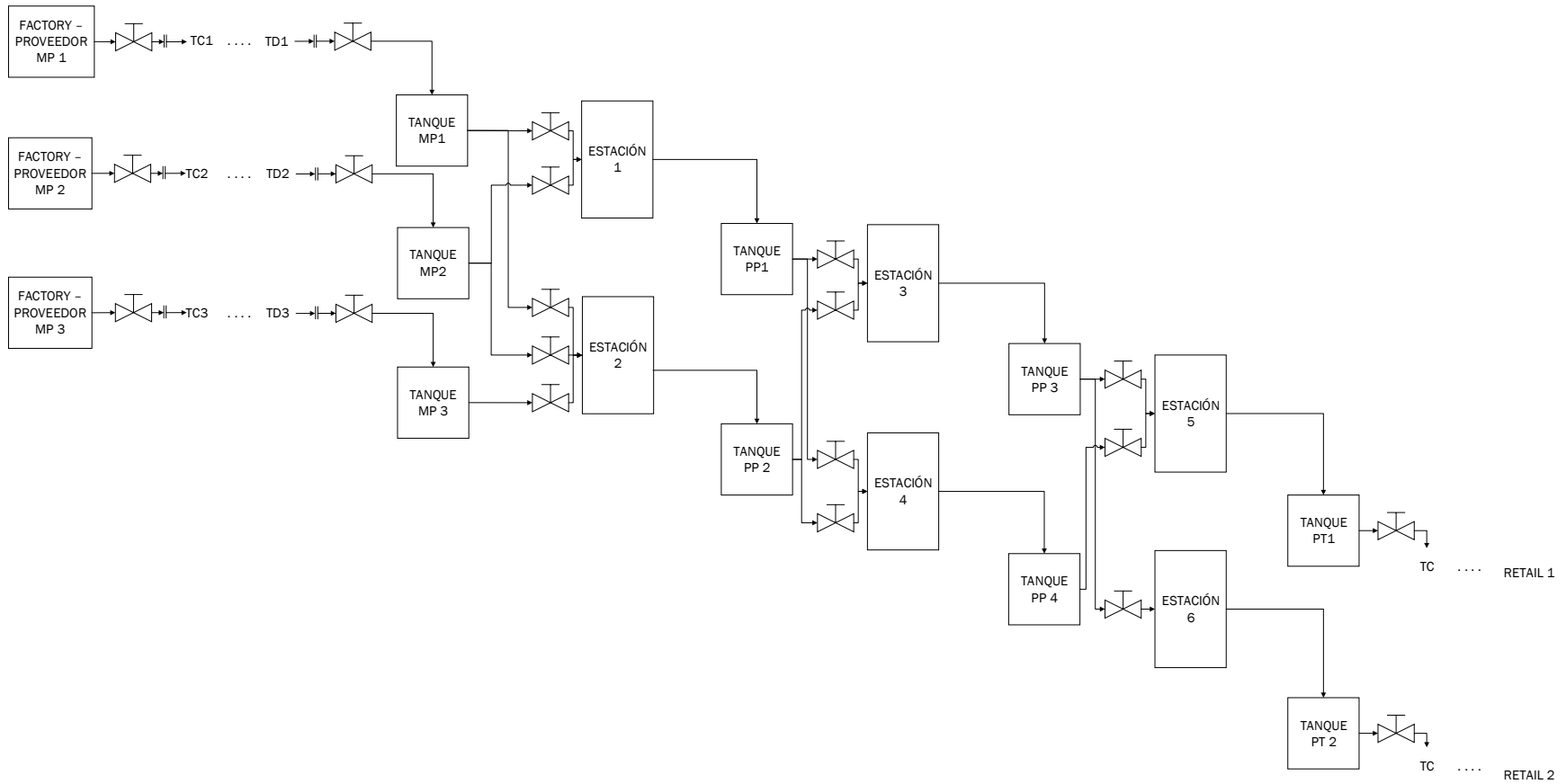


Ilustración 15 Sistema productivo Job Shop.

### Diagrama de bloques en lazo abierto proceso Job Shop

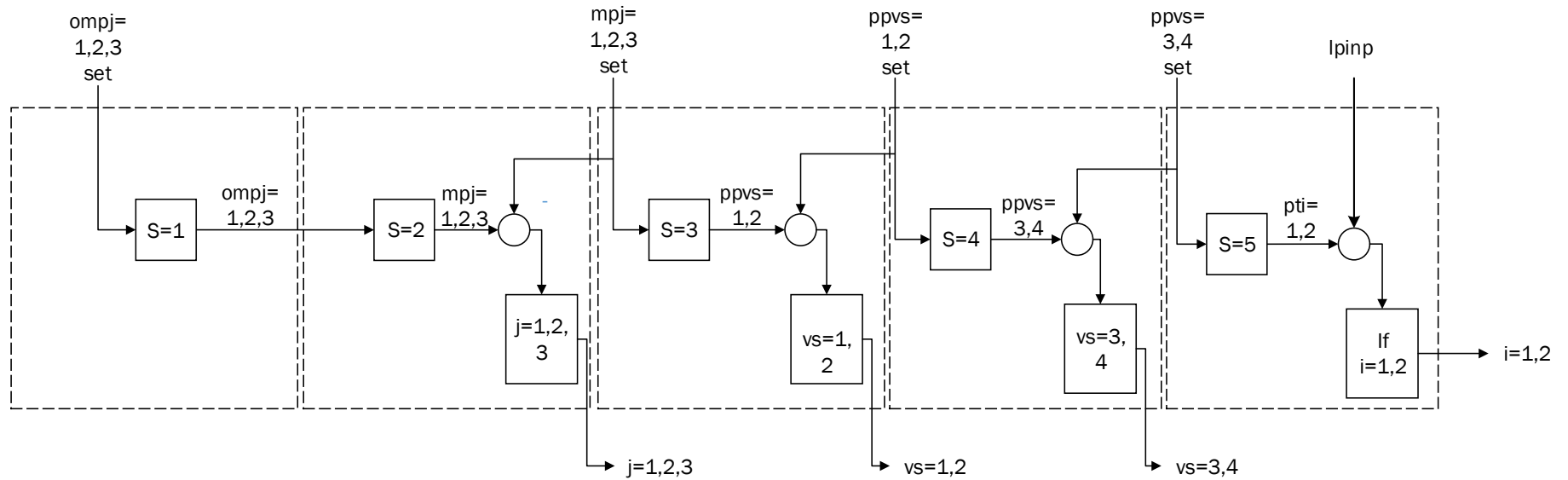


Ilustración 16 Diagrama de bloques lazo abierto para el sistema productivo Job Shop.

En donde:

$omp_j$	Cantidad entregada de materia j en una orden de producción.
$omp_j^{set}$	Cantidad requerida de materia prima j en una orden de producción.
$mp_j^{set}$	Cantidad requerida de materia prima j para la siguiente capa de proceso.
$pp_{v_s}^{set}$	Cantidad de producto en proceso requerido aguas abajo del proceso.
$pt_i$	Cantidad de producto terminado entregado de la capa final del proceso.
$lpinp$	Cantidad de producto terminado demanda por el mercado.

La representación de procesos industriales en diagrama de bloques es de gran utilidad para la correcta interpretación del sistema a controlar (lazo abierto). y la adecuada estructura de las estrategias de control propuestas (lazo cerrado). Ilustración 16 se presenta el diagrama de bloques en lazo abierto del proceso job shop, en donde se establece la secuencia de cada una de las capas “s” del proceso, referenciando para cada etapa las entradas y salidas que intervienen en el proceso.

## 6.2. Proceso productivo Flexible Flow Shop

El proceso productivo Flexible Flow Shop (FFS) cuenta con capacidad de producción continua, correspondiente a un proceso multi-producto, el proceso comprende una serie de transformaciones de producto que son expresadas mediante explosiones para la producción de una cantidad de producto terminado requerido, así:

Materia prima ( $j = 1,2,3$ ) – Producto en proceso ( $v_s = 9,10,11,12$ )

	PP9	PP10	PP11	PP12
MP1	1	1	1	0
MP2	1	0	1	1
MP3	0	2	1	1

Producto en proceso ( $v_s = 9,10,11,12$ ) – Producto en proceso ( $v_s = 5,6,7,8$ )

	PP5	PP6	PP7	PP8
PP9	1	0	1	1
PP10	2	1	0	1
PP11	0	1	1	0
PP12	0	0	0	1

Producto en proceso ( $v_s = 5,6,7,8$ ) – Producto en proceso ( $v_s = 1,2,3,4$ )

	PP1	PP2	PP3	PP4
PP5	1	0	1	0
PP6	1	1	0	0
PP7	0	2	0	1
PP8	0	0	3	1

Producto en proceso ( $v_s = 1,2,3,4$ ) – Producto terminado ( $i = 1,2,3,4,5,6$ )

	PT1	PT2	PT3	PT4	PT5	PT6
PP1	1	0	2	0	1	0
PP2	2	0	0	1	0	0
PP3	0	1	1	0	0	2
PP4	0	1	0	2	1	2

## Representación gráfica de proceso Flexible Flow Shop

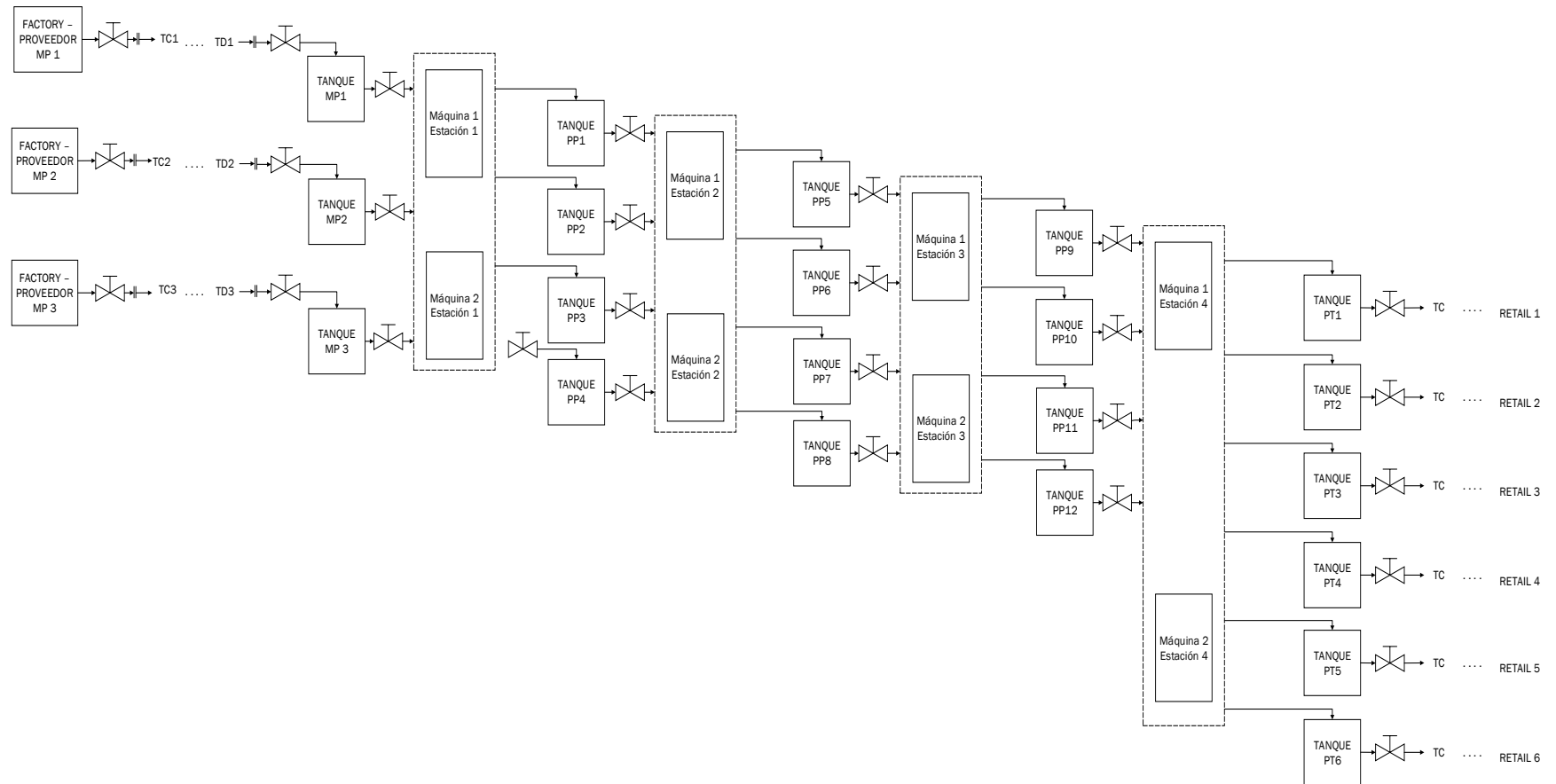


Ilustración 17 Sistema productivo Flexible Flow Shop.

### Diagrama de bloques en lazo abierto proceso Flexible Flow Shop

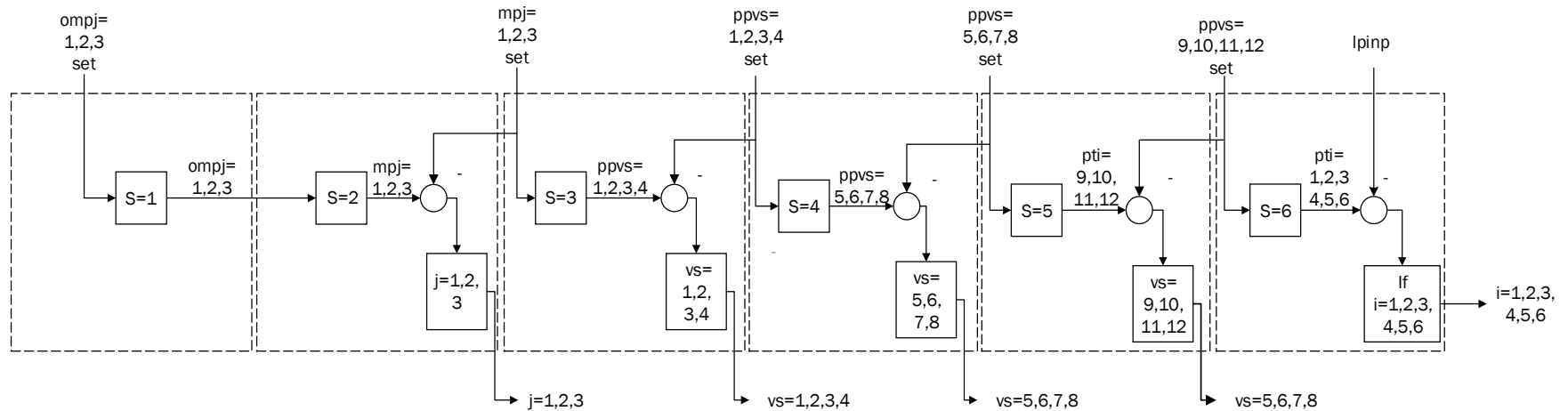


Ilustración 18 Diagrama de bloques lazo abierto para el sistema productivo Flexible Flow Shop.

En donde:

$omp_j$	Cantidad entregada de materia j en una orden de producción.
$omp_j^{set}$	Cantidad requerida de materia prima j en una orden de producción.
$mp_j^{set}$	Cantidad requerida de materia prima j para la siguiente capa de proceso.
$pp_{vs}^{set}$	Cantidad de producto en proceso requerido aguas abajo del proceso.
$pt_i$	Cantidad de producto terminado entregado de la capa final del proceso.
$lpinp$	Cantidad de producto terminado demanda por el mercado.



## 7. Implementación de las estrategias de control

En el marco del desarrollo de esta investigación se analiza el comportamiento de los inventarios bajo el control de dos tipos de estrategias: clásica y avanzada. La estrategia clásica se establece como proporcional (P) dadas las características integrantes del proceso [26]. La estrategia avanzada fue seleccionada de la familia de estrategias de control por modelos predictivos (MPC), partiendo de las características multi-variables y necesidades del proceso se eligió una estrategia con cualidades robustas, multi-variable, flexible e inteligente [41], características que brindan los modelos dinámicos matriciales (DMC) para controlar sistemas productivos.

### 7.1. Implementación y sintonía de la estrategia clásica de control

La estrategia clásica implementada hace referencia a un control por retroalimentación proporcional (P), sintonizado con ganancia 1 [26]. Esta estrategia es diseñada para procesos SISO, motivo por el cual es replicada para cada lazo de control requerido en el sistema. En esta sección se detallará el comportamiento dinámico de abastecimiento y desabastecimiento para cada capa del proceso, mediante la representación matemática de ecuaciones diferenciales de los balances de masa y dinámica de transporte, así como la implementación de esta estrategia control para los procesos JS y FFS.

#### 7.1.1. Proceso productivo Job Shop

A continuación, se exponen los lazos de control de flujo en el proceso Job Shop (que estarán subordinados como lazos esclavos en la estrategia de control clásica), en donde las transformaciones de producto están señaladas por “ $\Sigma$ ”, los sensores de flujo “ $FT$ ” y el controlador de flujo “ $FC$ ”.

Capa de proceso s=1:

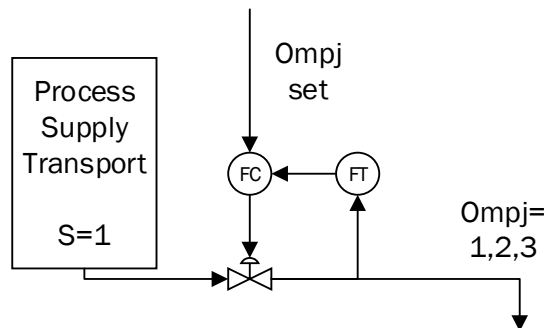


Ilustración 19 Diagrama de bloques capa s=1 – JS - PID.

$$\text{Balance de masa dinámico} \quad \tau_s \frac{d}{dt} omp_j(t) + omp_j(t) = omp_j^{set}(t) \quad \forall_{j=1,2,3}. \quad (46)$$

$$\text{Dinámica de transporte} \quad omp_j(t) = omp_j(t - t_o) \quad \forall_{j=1,2,3}. \quad (47)$$

Capa de proceso s=2:

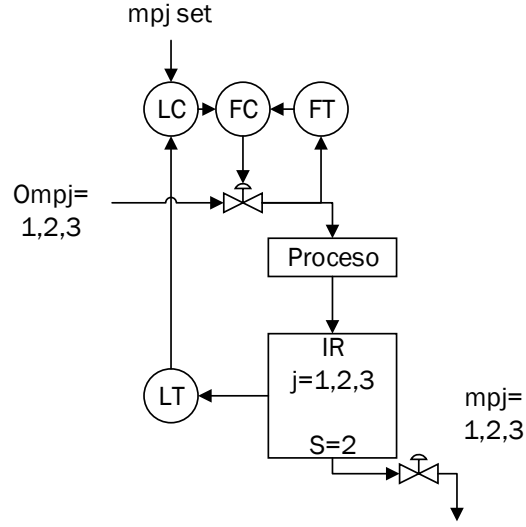


Ilustración 20 Diagrama de bloques capa s=2 – JS - PID.

$$\text{Balance de masa dinámico} \quad omp_j(t) - mp_j(t) = \frac{d}{dt} I_{jt}^R \quad \forall_{j=1,2,3}. \quad (48)$$

$$\text{Dinámica de transporte} \quad mp_j(t) = mp_j^{set}(t) \quad \forall_{j=1,2,3}. \quad (49)$$

Capa de proceso s=3:

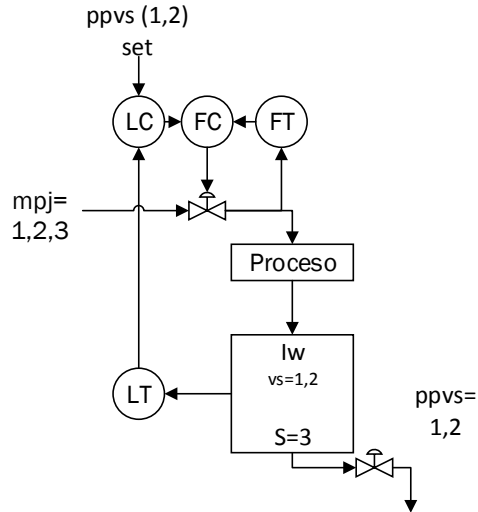


Ilustración 21 Diagrama de bloques capa s=3 – JS - PID.

$$\text{Balance de masa dinámico} \quad (mp_j(t) * \Sigma) - pp_{v_s}(t) = \frac{d}{dt} I_{v_s t}^w \quad \forall_{v_s=1,2}. \quad (50)$$

$$\text{Dinámica de transporte} \quad pp_{v_s}(t) = pp_{v_s}^{set}(t) \quad \forall_{v_s=1,2}. \quad (51)$$

Capa de proceso s=4:

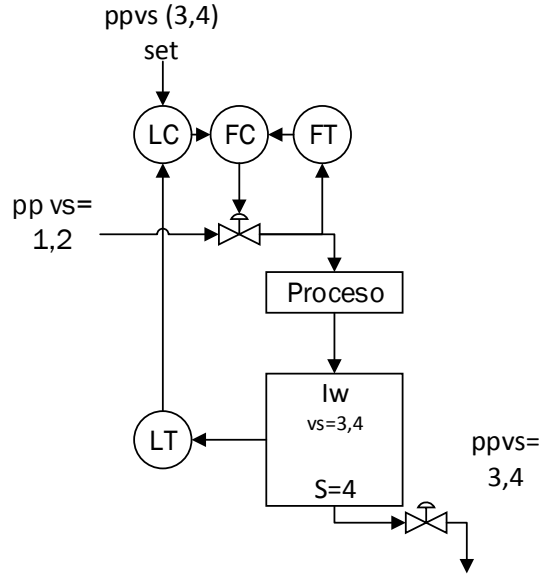


Ilustración 22 Diagrama de bloques capa s=4 – JS - PID.

$$\text{Balance de masa dinámico} \quad (pp_{v_{s-1}}(t) * \Sigma) - pp_{v_s}(t) = \frac{d}{dt} I_{v_s}^w \quad \forall_{v_s=3,4}. \quad (52)$$

$$\text{Dinámica de transporte} \quad pp_{v_s}(t) = pp_{v_s}^{set}(t) \quad \forall_{v_s=3,4}. \quad (53)$$

Capa de proceso s=5:

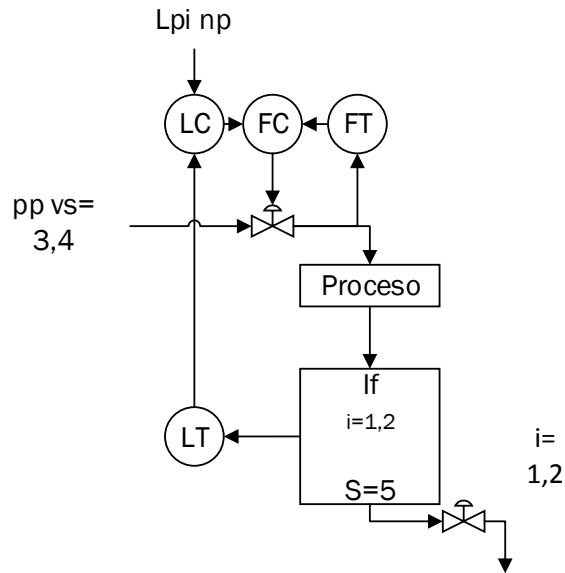


Ilustración 23 Diagrama de bloques capa s=5 – JS - PID.

$$\text{Balance de masa dinámico} \quad (pp_{v_{s-1}}(t) * \Sigma) - L_{p_{in_p}}(t) = \frac{d}{dt} I_i^F \quad \forall_{p_{ti}=1,2}. \quad (54)$$

$$\text{Dinámica de transporte} \quad L_{p_{in_p}} = l_{p_{in_p}}(t) \quad \forall_{l_{p_{in_p}}=1,2}. \quad (55)$$

## Diagrama de bloques en lazo cerrado proceso Job Shop

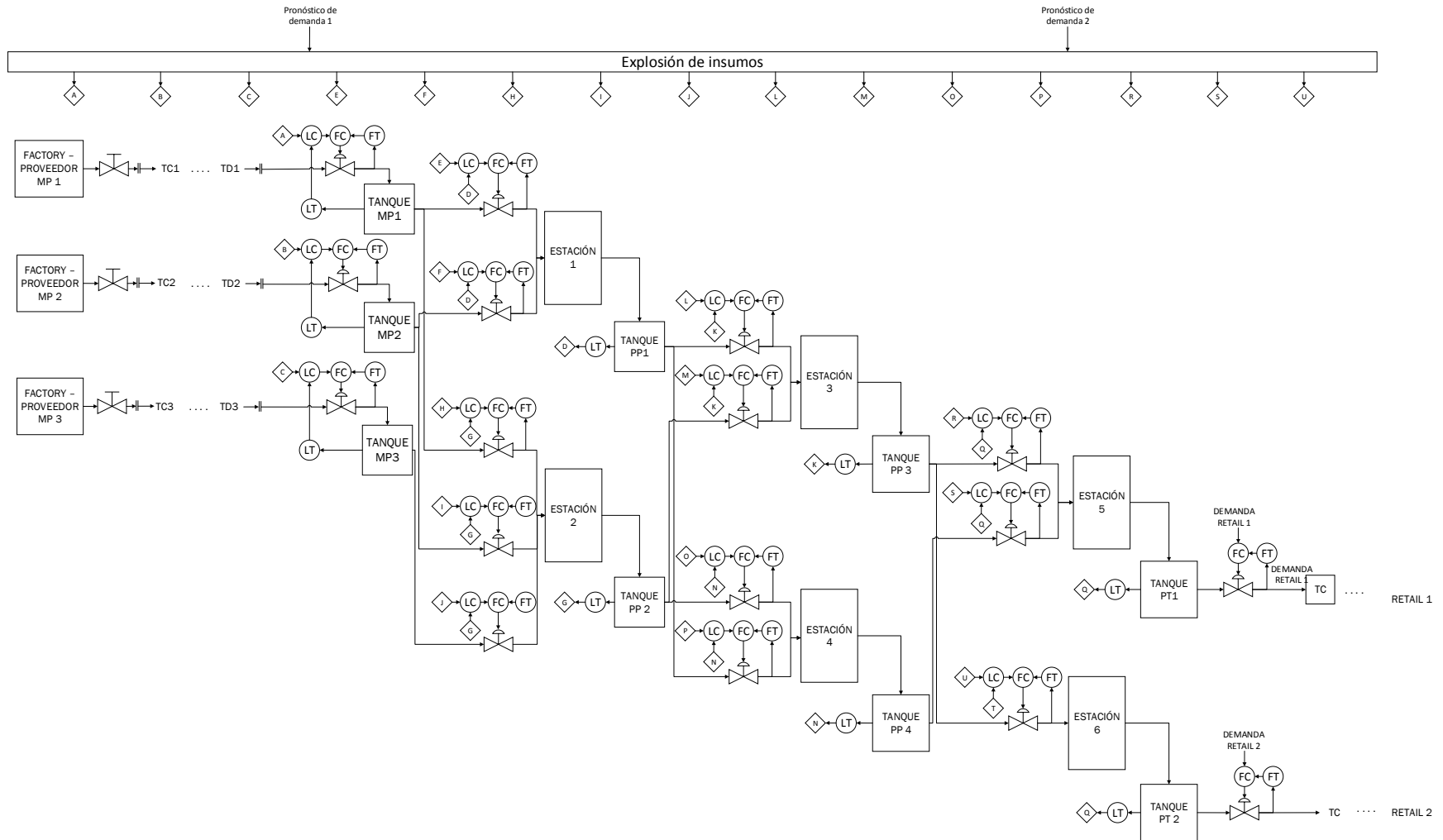


Ilustración 24 Diagrama de bloques en lazo cerrado proceso Job Shop - PID.

### 7.1.2. Proceso productivo Flexible Flow Shop

Los lazos de control de flujo del proceso Flexible Flow Shop que estarán subordinados como lazos esclavos en las estrategias de control clásico, en donde los sensores de flujo son “FT” y el controlador PID de flujo “FC”.

#### Capa de proceso s=1

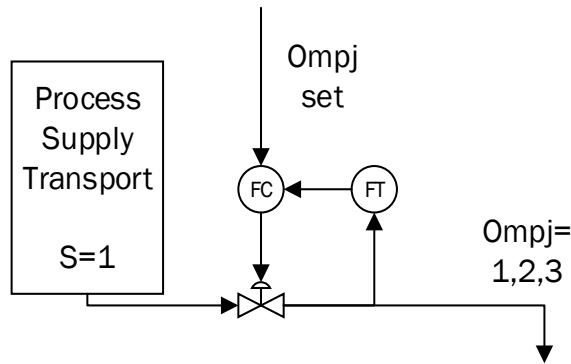


Ilustración 25 Diagrama de bloques capa s=1 – FFS - PID.

$$\text{Balance de masa dinámico} \quad \tau_s \frac{d}{dt} omp_j(t) + omp_j(t) = omp_j^{set}(t) \quad \forall_{j=1,2,3}. \quad (56)$$

$$\text{Dinámica de transporte} \quad omp_j(t) = omp_j(t - t_o) \quad \forall_{j=1,2,3}. \quad (57)$$

#### Capa de proceso s=2

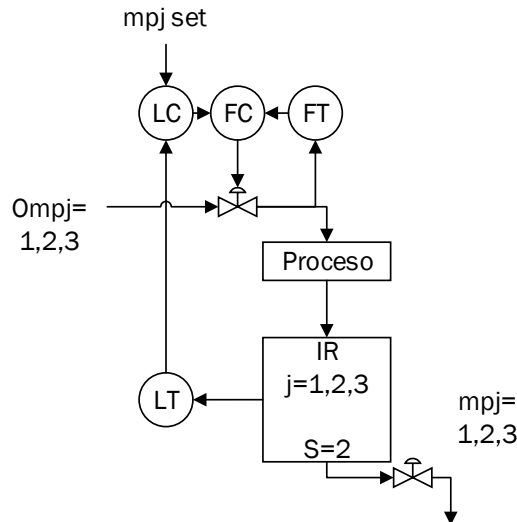


Ilustración 26 Diagrama de bloques capa s=2 – FFS - PID.

$$\text{Balance de masa dinámico} \quad omp_j(t) - mp_j(t) = \frac{d}{dt} I_{jt}^R \quad \forall_{j=1,2,3}. \quad (58)$$

$$\text{Dinámica de transporte} \quad mp_j(t) = mp_j^{set}(t) \quad \forall_{j=1,2,3}. \quad (59)$$

### Capa de proceso s=3

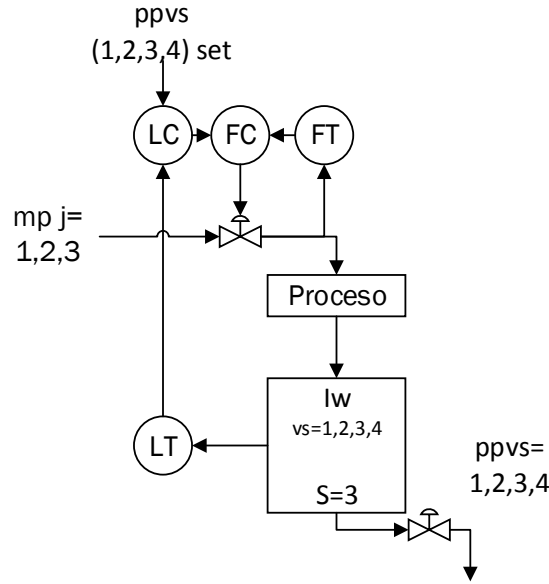


Ilustración 27 Diagrama de bloques capa s=3 – FFS - PID.

$$\text{Balance de masa dinámico} \quad (mp_j(t) * \Sigma) - pp_{v_s}(t) = \frac{d}{dt} I_{v_s t}^w \quad \forall_{v_s=1,2,3,4} \quad (60)$$

$$\text{Dinámica de transporte} \quad pp_{v_s}(t) = pp_{v_s}^{set}(t) \quad \forall_{v_s=1,2,3,4} \quad (61)$$

### Capa de proceso s=4

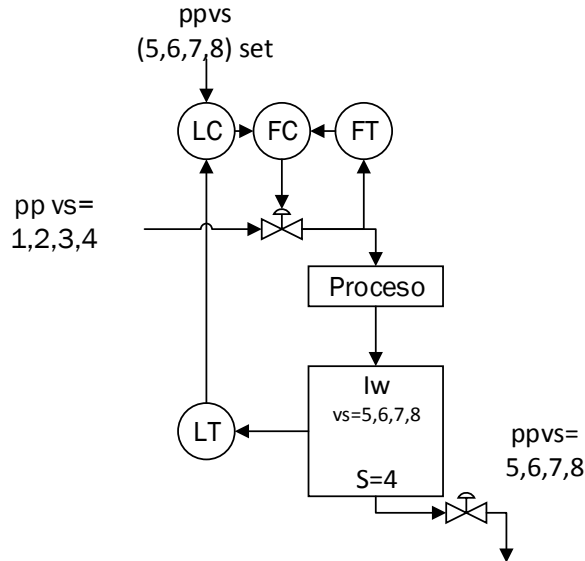


Ilustración 28 Diagrama de bloques capa s=4 – FFS - PID.

$$\text{Balance de masa dinámico} \quad (pp_{v_{s-1}}(t) * \Sigma) - pp_{v_s}(t) = \frac{d}{dt} I_{v_s t}^w \quad \forall_{v_s=5,6,7,8}. \quad (62)$$

$$\text{Dinámica de transporte} \quad pp_{v_s}(t) = pp_{v_s}^{set}(t) \quad \forall_{v_s=5,6,7,8}. \quad (63)$$

### Capa de proceso s=5

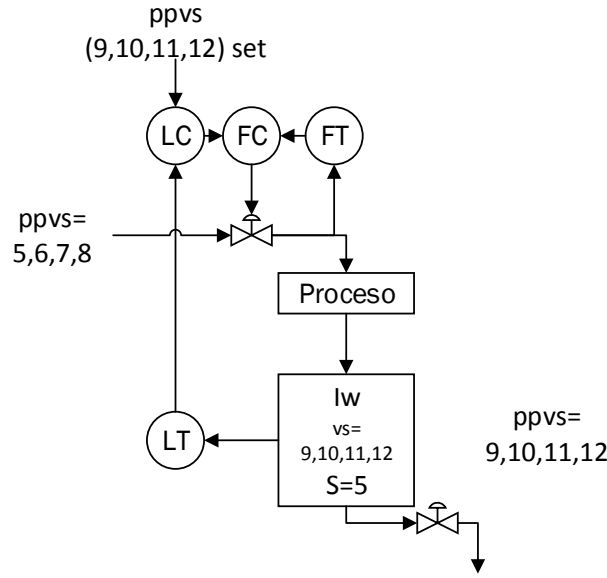


Ilustración 29 Diagrama de bloques capa s=5 – FFS - PID.

*Balance de masa dinámico*  $(pp_{v_{s-1}}(t) * \Sigma) - pp_{v_s}(t) = \frac{d}{dt} I_{v_s}^w \quad \forall_{v_s=9,10,11,12}. \quad (64)$

*Dinámica de transporte*  $pp_{v_s}(t) = pp_{v_s}^{set}(t) \quad \forall_{v_s=9,10,11,12}. \quad (65)$

### Capa de proceso s=6

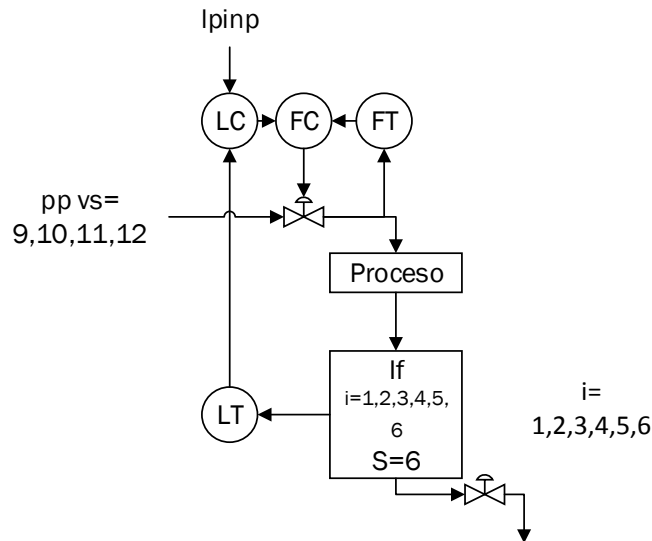


Ilustración 30 Diagrama de bloques capa s=6 – FFS - PID.

*Balance de masa dinámico*  $(pp_{v_{s-1}}(t) * \Sigma) - L_{p_{i n_p}}(t) = \frac{d}{dt} I_i^F \quad \forall_{p_{ti}=1,2,3,4,5,6}. \quad (66)$

*Dinámica de transporte*  $L_{p_{i n_p}} = l_{p_{i n_p}}(t) \quad \forall_{l_{p_{i n_p}}=1,2,3,4,5,6}. \quad (67)$

## Diagrama de bloques en lazo cerrado proceso Flexible Flow Shop – PID

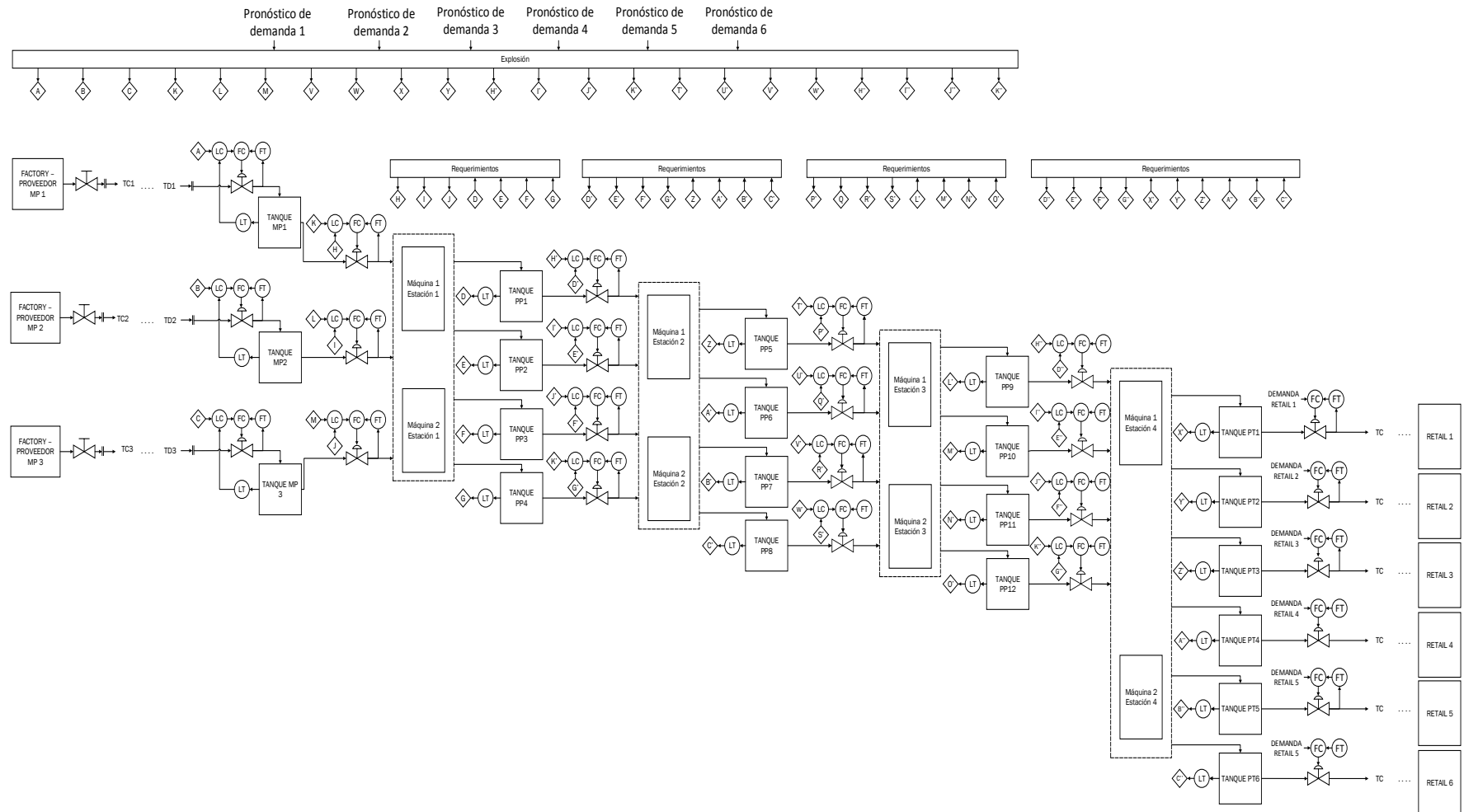


Ilustración 31 Diagrama de bloques en lazo cerrado proceso Flexible Flow Shop – PID.



## 7.2. Implementación y sintonía de la estrategia de control - DMC

La estrategia de control dinámico matricial (DMC) a partir un lazo MIMO realiza el manejo de las variables manipuladas del sistema, en pro de la administración de las variables controladas del mismo, mediante un único controlador predictivo que procura mantener dichas señales en los valores de set point establecidos. Debido a la naturaleza integrante del proceso fueron requeridas modificaciones para adaptar el algoritmo tradicional DMC a este tipo de procesos [48], como se describió en la sección 4.1.3. Los parámetros de sintonía de esta estrategia ( $\lambda$  y  $f$ ) fueron determinados mediante la herramienta computacional “fmincon” del software Matlab®, la cual se encargó de establecer valores independientes para cada parámetro de sintonía ( $\lambda$ ) del sistema que minimizara la sumatoria del valor absoluto del error (IAE) para todos los lazos, con un  $f = 2,6$ . Los valores establecidos para tipo de proceso son:

### Job Shop

$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$	$\lambda_7$	$\lambda_8$	$\lambda_9$
20	20	22	20	20	21	18	18	20

### Flexible Flow Shop

$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$	$\lambda_7$	$\lambda_8$	$\lambda_9$	$\lambda_{10}$	$\lambda_{11}$
71,36	50,74	39,26	6,80	2,99	6,11	67,25	2,30	1,28	1,26	2,09
$\lambda_{12}$	$\lambda_{13}$	$\lambda_{14}$	$\lambda_{15}$	$\lambda_{16}$	$\lambda_{17}$	$\lambda_{18}$	$\lambda_{19}$	$\lambda_{20}$	$\lambda_{21}$	
39,47	0,736	1,86	0,41	14,27	5,52	18,42	12,15	32,80	95,66	

En esta sección se detallará el comportamiento dinámico del proceso, mediante la representación matemática de ecuaciones diferenciales de los balances de masa, dinámica de transporte y la implementación de DMC para los procesos JS y FFS.

### 7.2.1. Proceso productivo Job Shop

#### Capa de proceso s=1

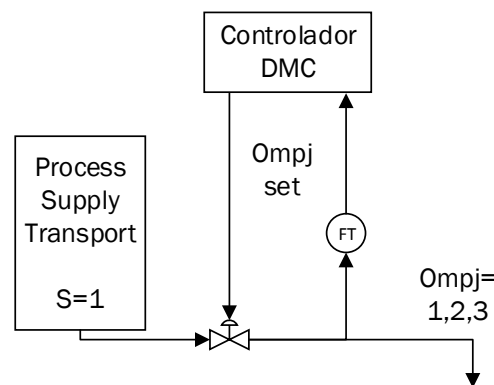


Ilustración 32 Diagrama de bloques capa s=1 – JS – DMC.

$$\text{Balance de masa dinámico} \quad \tau_s \frac{d}{dt} omp_j(t) + omp_j(t) = omp_j^{set}(t) \quad \forall_{j=1,2,3}. \quad (68)$$

$$\text{Dinámica de transporte} \quad omp_j(t) = omp_j(t - t_o) \quad \forall_{j=1,2,3}. \quad (69)$$

### Capa de proceso s=2

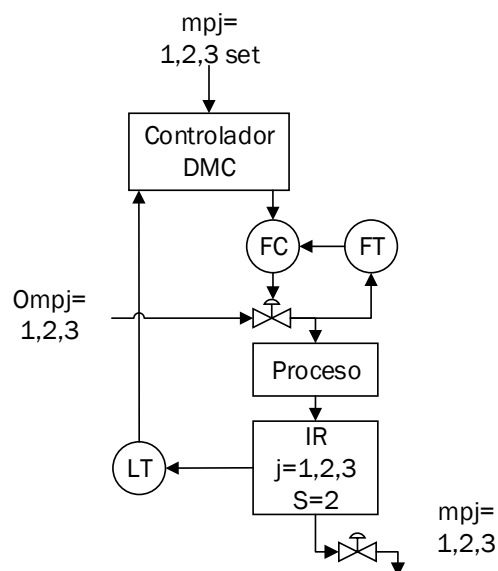


Ilustración 33 Diagrama de bloques capa s=2 – JS – DMC.

$$\text{Balance de masa dinámico} \quad omp_j(t) - mp_j(t) = \frac{d}{dt} I_{jt}^R \quad \forall_{j=1,2,3}. \quad (70)$$

$$\text{Dinámica de transporte} \quad mp_j(t) = mp_j^{set}(t) \quad \forall_{j=1,2,3}. \quad (71)$$

### Capa de proceso s=3

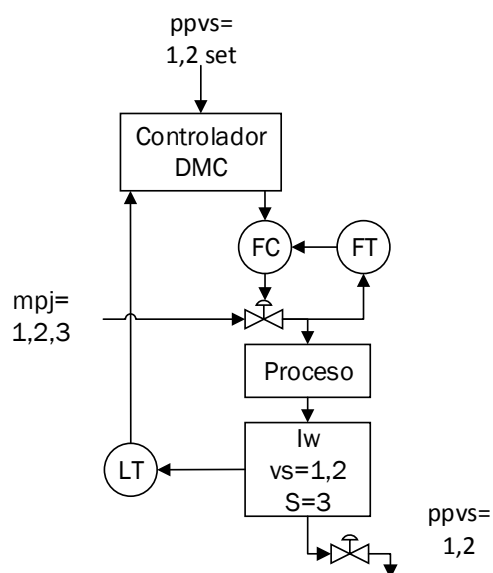


Ilustración 34 Diagrama de bloques capa s=3 – JS – DMC.

$$\text{Balance de masa dinámico} \quad (mp_j(t) * \Sigma) - pp_{v_s}(t) = \frac{d}{dt} I_{v_s t}^w \quad \forall v_s=1,2. \quad (72)$$

$$\text{Dinámica de transporte} \quad pp_{v_s}(t) = pp_{v_s}^{set}(t) \quad \forall_{v_s=1,2}. \quad (73)$$

#### Capa de proceso s=4

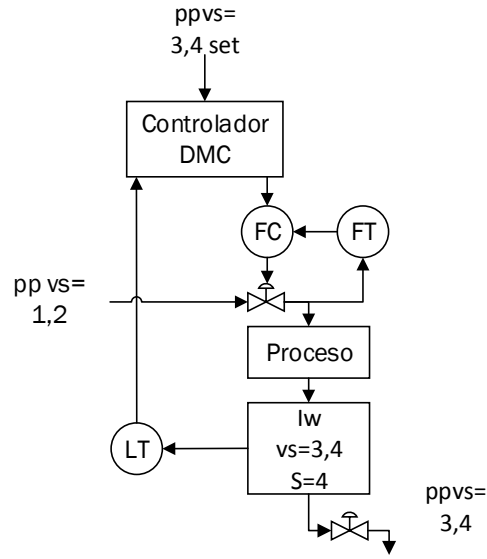


Ilustración 35 Diagrama de bloques capa s=4 – JS – DMC.

$$\text{Balance de masa dinámico} \quad (ppv_{v_{s-1}}(t) * \Sigma) - ppv_{v_s}(t) = \frac{d}{dt} I_{v_{st}}^w \quad \forall_{v_s=3,4}. \quad (74)$$

$$\text{Dinámica de transporte} \quad ppv_{v_s}(t) = ppv_{v_s}^{set}(t) \quad \forall_{v_s=3,4}. \quad (75)$$

#### Capa de proceso s=5

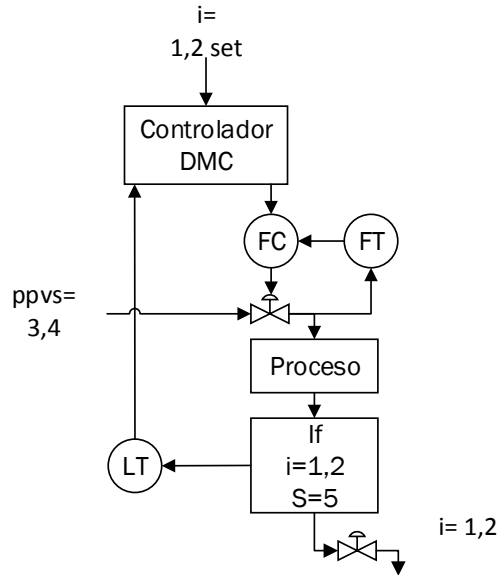


Ilustración 36 Diagrama de bloques capa s=5 – JS – DMC.

$$\text{Balance de masa dinámico} \quad (ppv_{v_{s-1}}(t) * \Sigma) - L_{p_{in_p}}(t) = \frac{d}{dt} I_i^F \quad \forall_{p_{ti}=1,2}. \quad (76)$$

$$\text{Dinámica de transporte} \quad L_{p_{in_p}} = l_{p_{in_p}}(t) \quad \forall_{l_{p_{in_p}}=1,2}. \quad (77)$$

## Diagrama de bloques en lazo cerrado proceso Job Shop - DMC

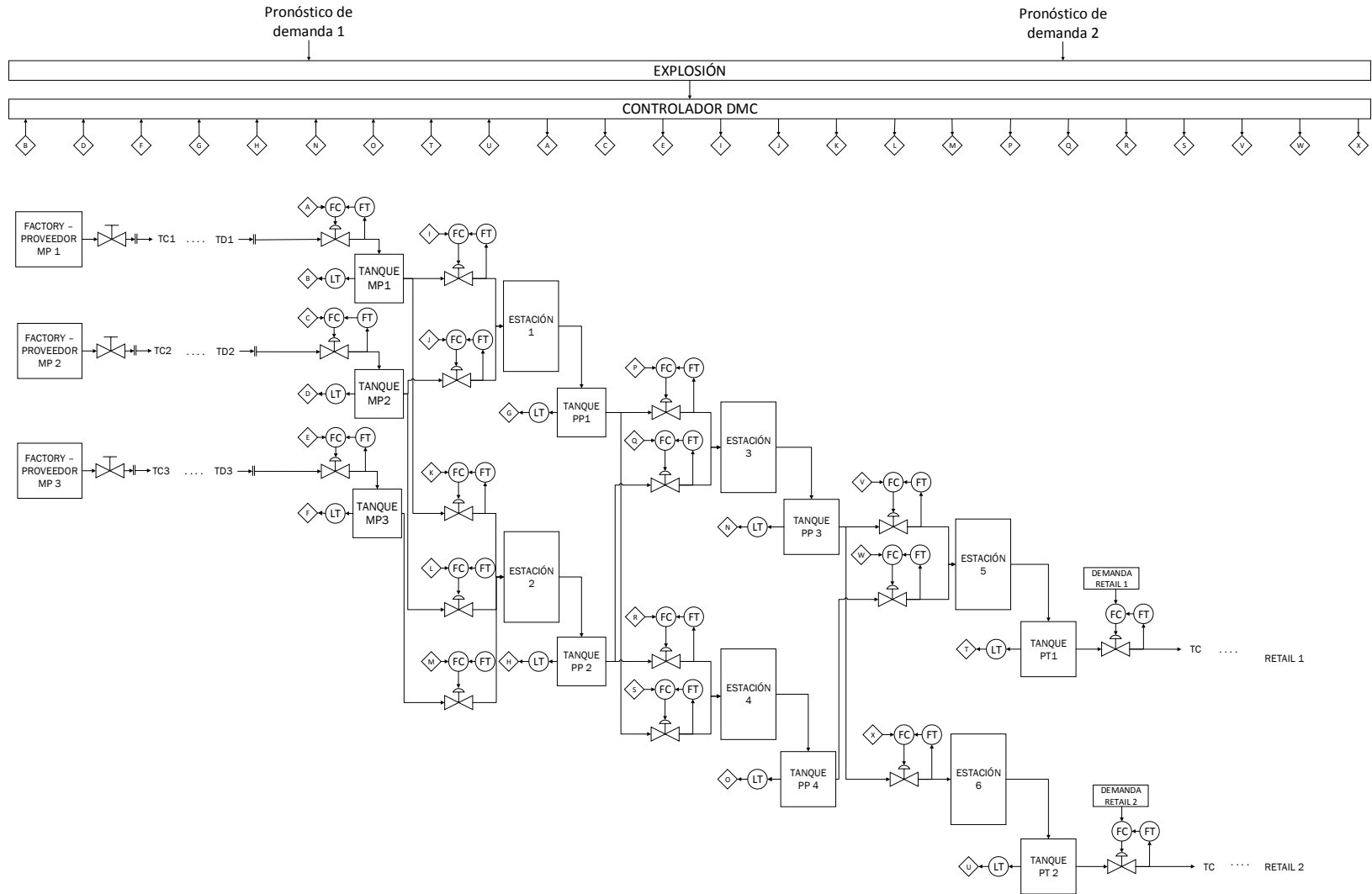


Ilustración 37 Diagrama de bloques en lazo cerrado proceso Job Shop - DMC

## 7.2.2. Proceso productivo Flexible Flow Shop

### Capa de proceso s=1

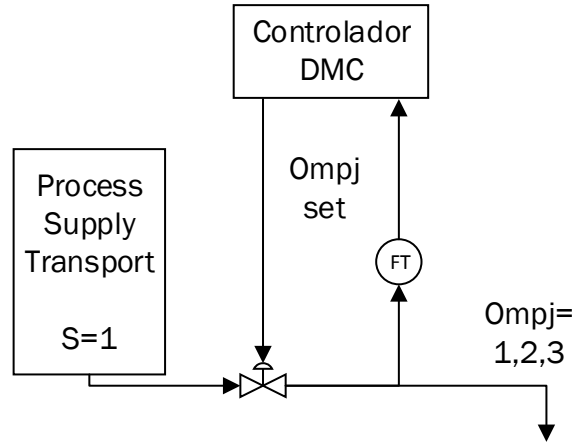


Ilustración 38 Diagrama de bloques capa s=1 - FFS - DMC.

*Balance de masa dinámico*  $\tau_s \frac{d}{dt} omp_j(t) + omp_j(t) = omp_j^{set}(t) \quad \forall_{j=1,2,3}. \quad (78)$

*Dinámica de transporte*  $omp_j(t) = omp_j(t - t_o) \quad \forall_{j=1,2,3}. \quad (79)$

### Capa de proceso s=2

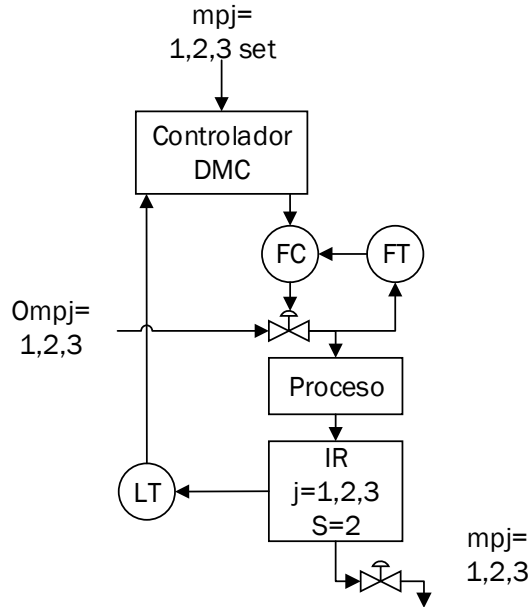


Ilustración 39 Diagrama de bloques capa s=2 - FFS - DMC.

*Balance de masa dinámico*  $omp_j(t) - mp_j(t) = \frac{d}{dt} I_{jt}^R \quad \forall_{j=1,2,3}. \quad (80)$

*Dinámica de transporte*  $mp_j(t) = mp_j^{set}(t) \quad \forall_{j=1,2,3}. \quad (81)$

### Capa de proceso s=3

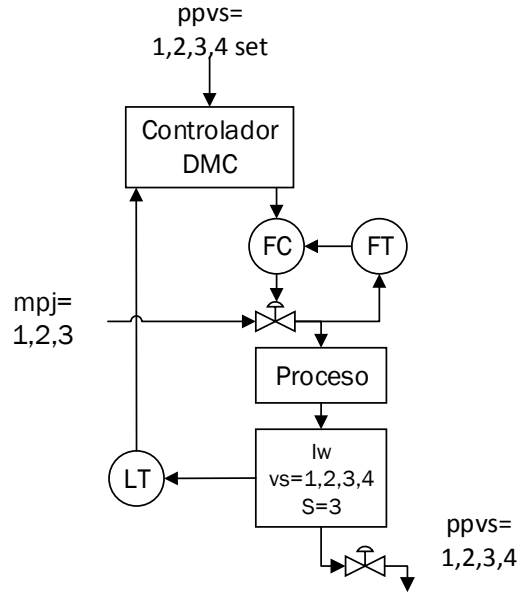


Ilustración 40 Diagrama de bloques capa s=3 - FFS - DMC.

$$\text{Balance de masa dinámico} \quad (mp_j(t) * \Sigma) - pp_{v_s}(t) = \frac{d}{dt} I_{v_s,t}^w \quad \forall v_s=1,2,3,4. \quad (82)$$

$$\text{Dinámica de transporte} \quad pp_{v_s}(t) = pp_{v_s}^{set}(t) \quad \forall v_s=1,2,3,4. \quad (83)$$

### Capa de proceso s=4

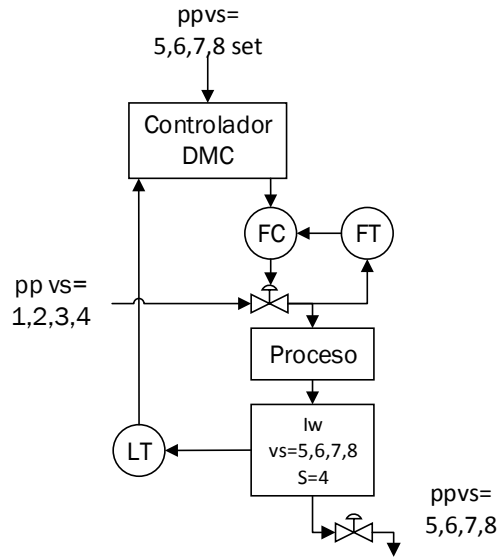


Ilustración 41 Diagrama de bloques capa s=4 - FFS - DMC.

$$\text{Balance de masa dinámico} \quad (pp_{v_{s-1}}(t) * \Sigma) - pp_{v_s}(t) = \frac{d}{dt} I_{v_s,t}^w \quad \forall v_s=5,6,7,8. \quad (84)$$

$$\text{Dinámica de transporte} \quad pp_{v_s}(t) = pp_{v_s}^{set}(t) \quad \forall v_s=5,6,7,8. \quad (85)$$

### Capa de proceso s=5

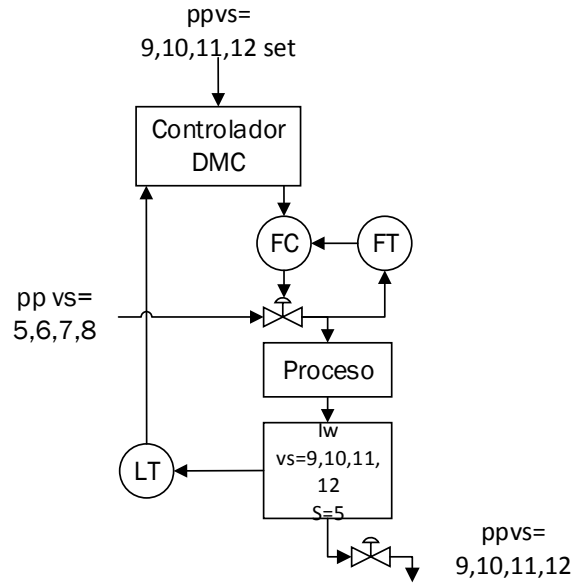


Ilustración 42 Diagrama de bloques capa s=5 – FFS – DMC.

$$\text{Balance de masa dinámico} \quad (pp_{v_{s-1}}(t) * \Sigma) - pp_{v_s}(t) = \frac{d}{dt} I_{v_s t}^w \quad \forall_{v_s=9,10,11,12} \quad (86)$$

$$\text{Dinámica de transporte} \quad pp_{v_s}(t) = pp_{v_s}^{set}(t) \quad \forall_{v_s=9,10,11,12}. \quad (87)$$

### Capa de proceso s=6

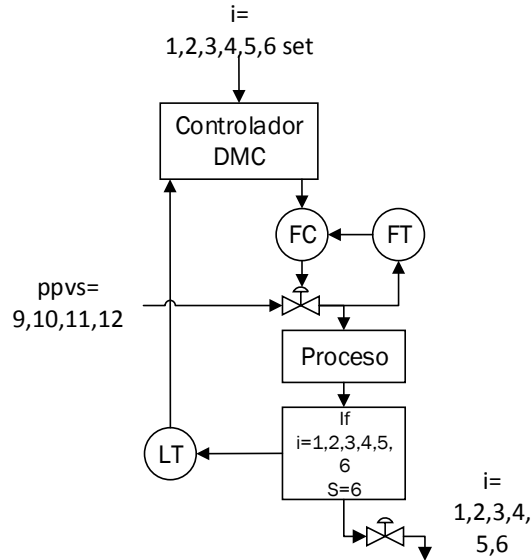


Ilustración 43 Diagrama de bloques capa s=6 – FFS – DMC.

$$\text{Balance de masa dinámico} \quad (pp_{v_{s-1}}(t) * \Sigma) - L_{p_{in_p}}(t) = \frac{d}{dt} I_i^F \quad \forall_{p_{ti}=1,2,3,4,5,6}. \quad (88)$$

$$\text{Dinámica de transporte} \quad L_{p_{in_p}} = l_{p_{in_p}}(t) \quad \forall_{l_{p_{in_p}}=1,2,3,4,5,6}. \quad (89)$$

## Diagrama de bloques en lazo cerrado proceso Flexible Flow Shop - DMC

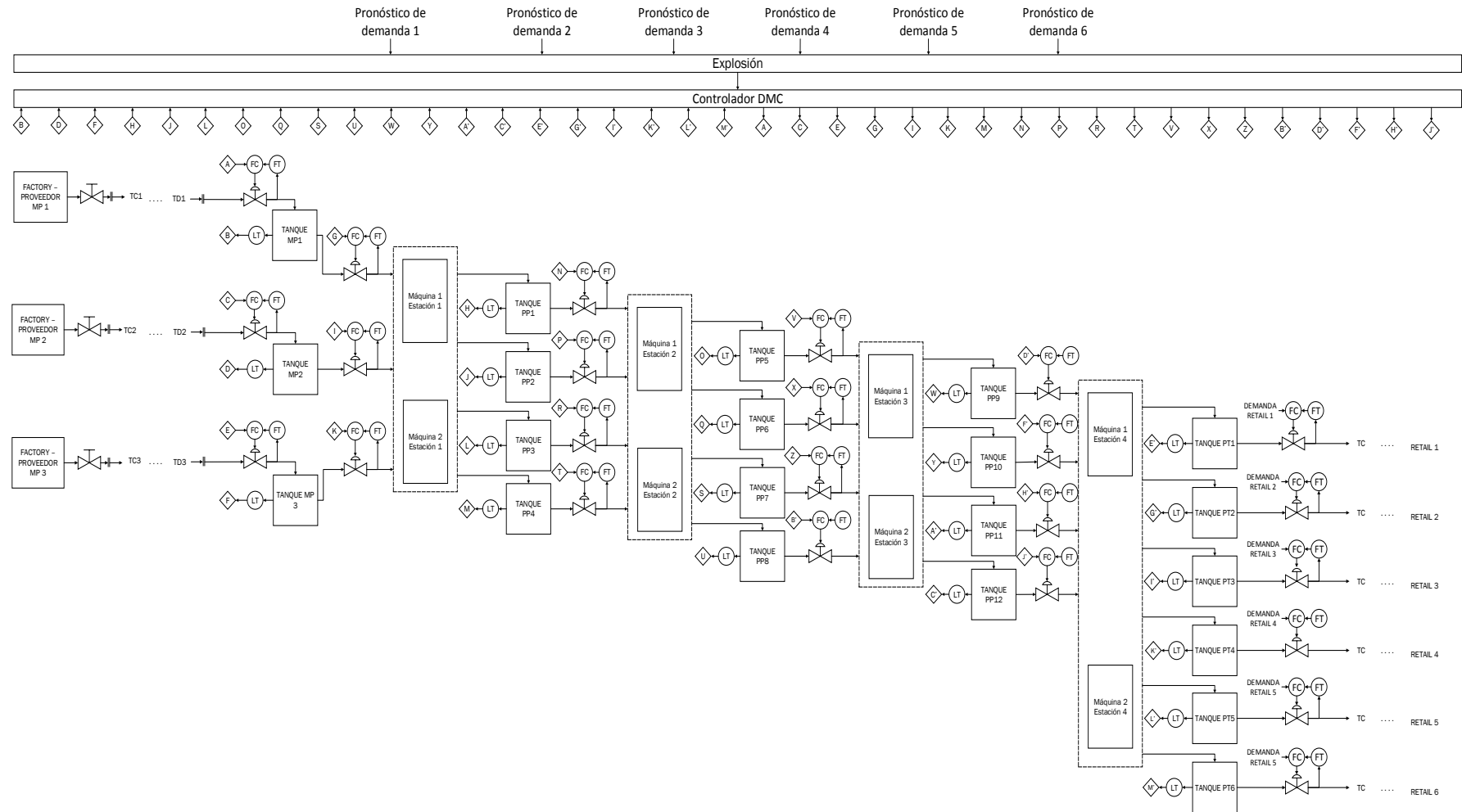


Ilustración 44 Diagrama de bloques en lazo cerrado proceso Flexible Flow Shop - DMC



## 8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Partiendo de la analogía de comportamiento de los inventarios desarrollada en la sección 4, se realiza en este segmento un análisis de la dinámica de abastecimiento y desabastecimiento de los sistemas de almacenamiento resultado de las estrategias de control señaladas en la sección 7. Los factores que intervienen en la mencionada dinámica son:

- Producto terminado: Describe el comportamiento de la producción producto terminado, es decir, la tasa en la que el sistema produce en el horizonte de tiempo. Esta producción se basa en el pronóstico que se establece como salida del sistema.
- Demanda producto terminado: Representa la dinámica de los requerimientos del mercado en unidades de producto terminado, con el fin de establecer las salidas reales del sistema.
- Unidades de inventario: Caracteriza el comportamiento del nivel del tanque de producto terminado, es la integral de la diferencia entre las unidades producidas y la demanda de producto terminado.

El análisis del comportamiento de inventario que se desarrolló en esta investigación es ejemplificado en la *Ilustración 45*, en donde se observan tres gráficos que muestran la respuesta del sistema en las cantidades de producción y el nivel de inventario (gráficos 1 y 3 respectivamente), frente cambios en la demanda (gráfico 2). Observándose un incremento en la producción y un descenso pronunciado en los niveles de inventario respecto al valor set point del nivel, cuando la demanda del mercado aumenta.

Este análisis es base para la evaluación de desempeño de las de las estrategias de control PID y DMC, dichas estrategias procuran mantener el nivel del tanque en un valor deseado, con el fin de disminuir los faltantes en la operación del sistema. La evaluación se realizó en los tanques de materia prima, producto en proceso y producto terminado en los sistemas Job Shop (JS) y Flexible Flow Shop (FFS) En este segmento se analizan los resultados de los productos terminados, para la demanda tipo 1, perturbación tipo 1, en los dos tipos de proceso, con las dos estrategias de control. La totalidad de los resultados obtenidos se exponen en los anexos del 4 al 38. Adicionalmente, se desarrolla un diseño de experimentos que permite la identificación de los factores significativos en el control de los sistemas de almacenamiento, que a su vez se encuentran directamente relacionados a los costos del proceso.

## Análisis del comportamiento del inventario

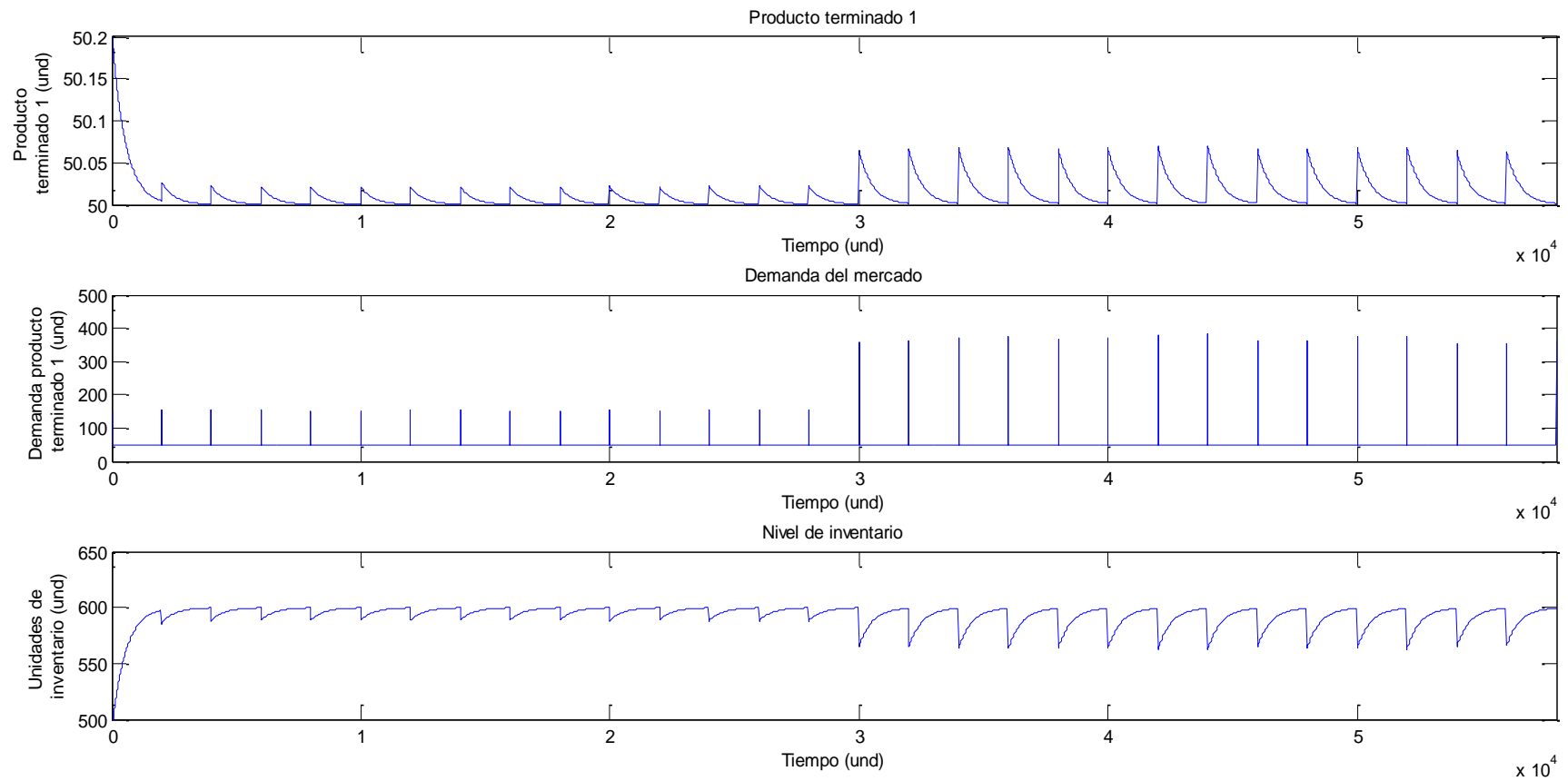


Ilustración 45 Comportamiento del inventario en el tiempo

## 8.1. Análisis proceso Job Shop

### Proceso Job Shop con estrategia clásica de control (P)

En la *Ilustración 46* y la *Ilustración 47* se observa el comportamiento de los lazos referentes a la dinámica de abastecimiento de los productos terminados 1 y 2, respectivamente, con la estrategia clásica de control. Se evidencia un comportamiento ajustado a los valores de referencia solicitados, con una respuesta rápida del proceso.

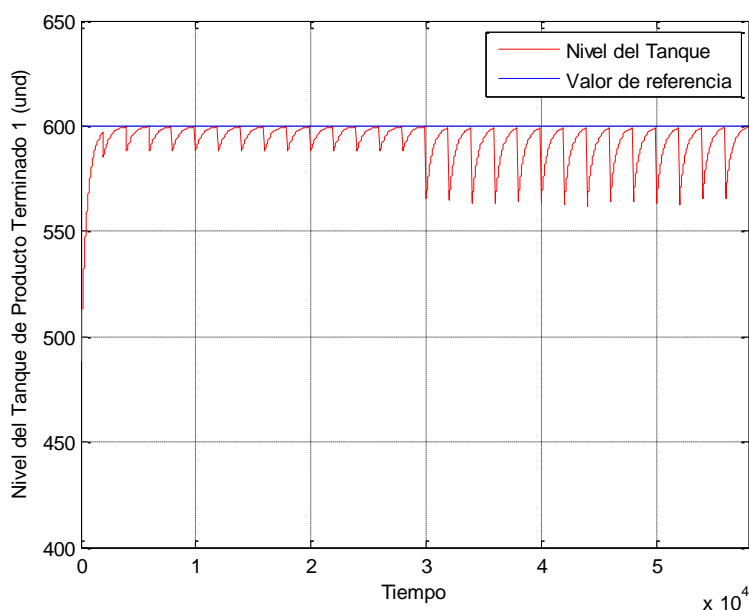


Ilustración 46 Variable PT 1 con PID en el proceso JS – D1 – P1.

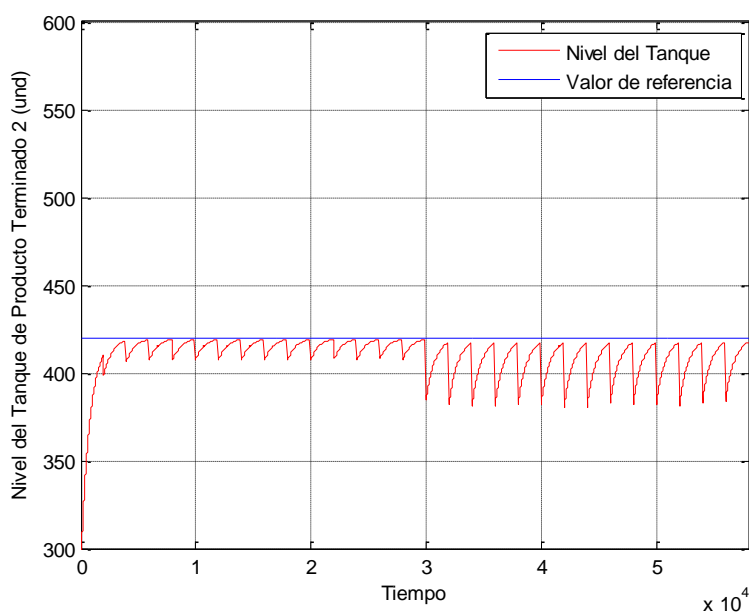


Ilustración 47 Variable PT 2 con PID en el proceso JS – D1 – P1.

### Proceso Job Shop con estrategia avanzada de control (DMC)

La dinámica de aprovisionamiento en los productos terminados 1 y 2 se muestra en la *Ilustración 48* y la *Ilustración 49* respectivamente. Se evidencia un comportamiento oscilatorio con un poco de overshoot, sin embargo, en los dos casos la señal se ajusta al valor de referencia requerido, con una respuesta rápida en el proceso.

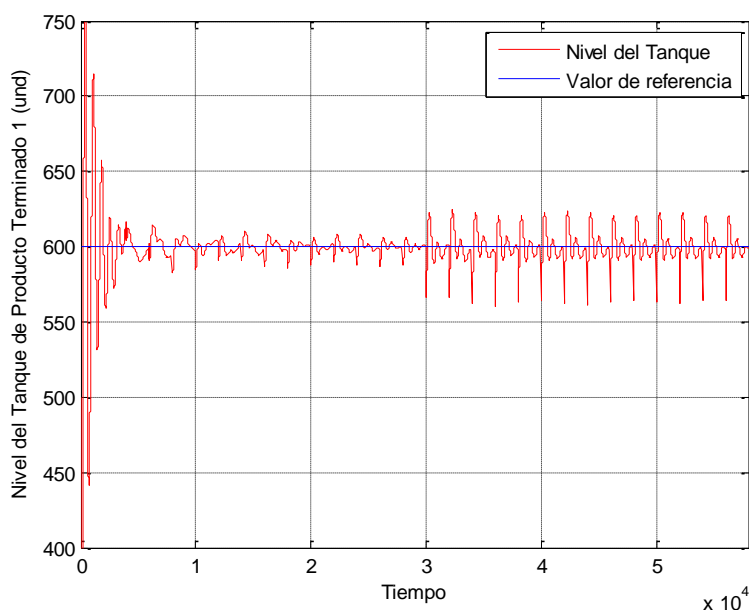


Ilustración 48 Variable PT 1 con DMC en el proceso JS - D1 - P1.

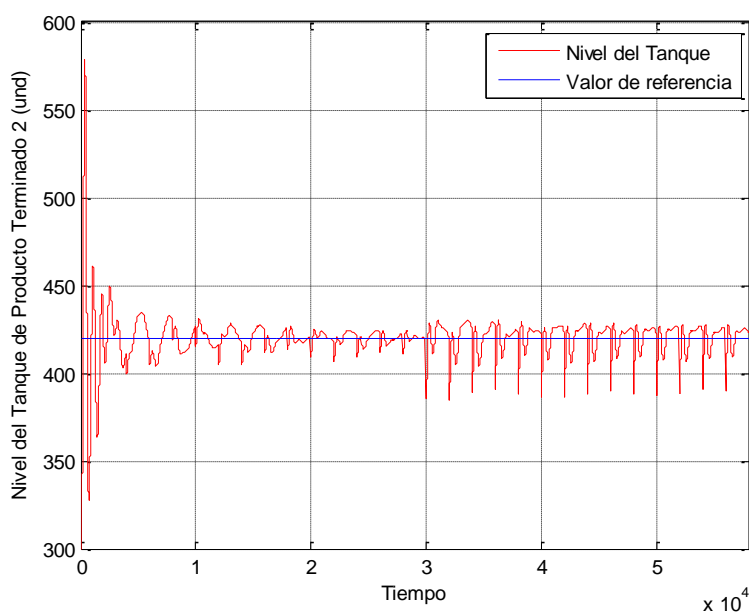


Ilustración 49 Variable PT 2 con DMC en el proceso JS - D1 - P1.

## 8.2. Análisis proceso Flexible Flow Shop

### Proceso Flexible Flow Shop con estrategia clásica de control (P)

Las respuestas de los inventarios de los productos terminados 1, 2, 3, 4, 5 y 6, son mostrados respectivamente en la *Ilustración 50*, *Ilustración 51*, *Ilustración 52*, *Ilustración 53*, *Ilustración 54* y *Ilustración 55*. Se evidencia una respuesta rápida en los 6 casos, no obstante, hay presencia de off set en la señal, es decir, los niveles no están llegando a los valores de referencia establecidos.

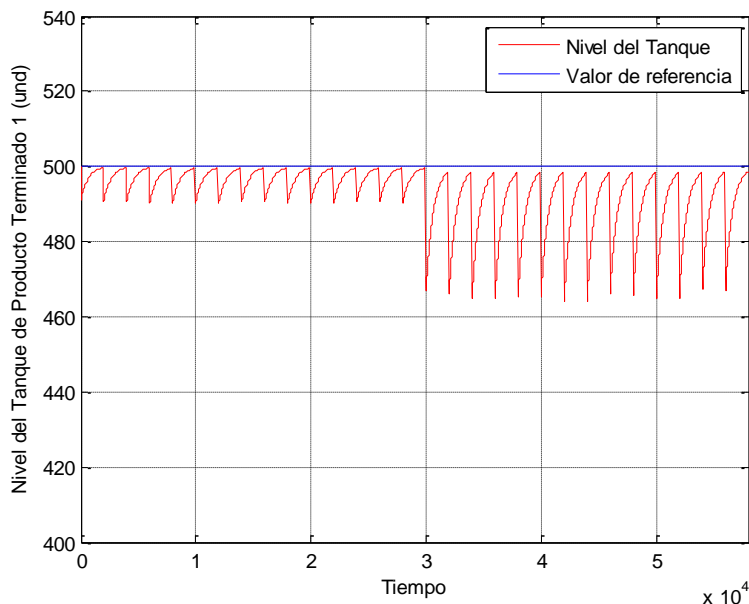


Ilustración 50 Variable PT 1 con PID en el proceso FFS – D1 – P1.

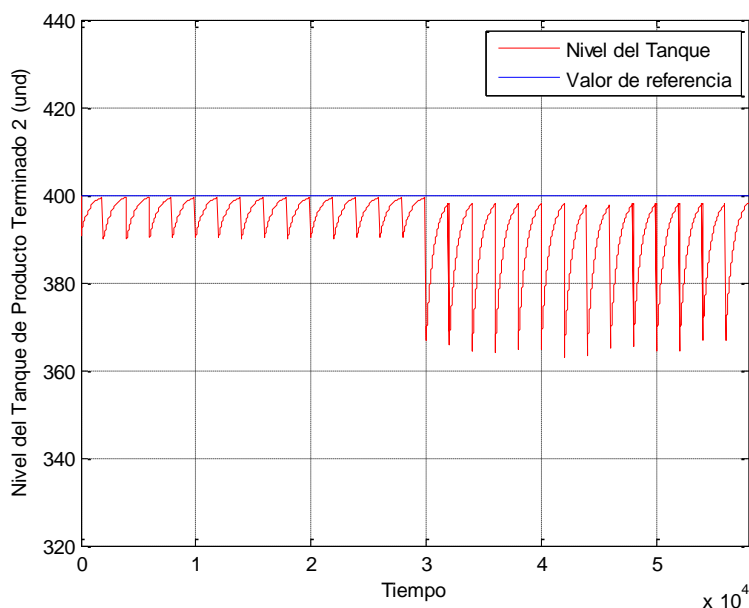


Ilustración 51 Variable PT 2 con PID en el proceso FFS – D1 – P1.

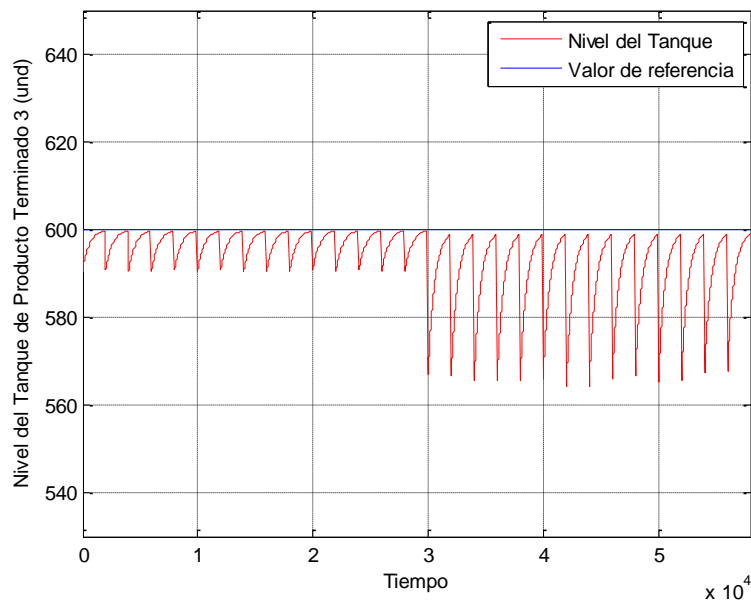


Ilustración 52 Variable PT 3 con PID en el proceso FFS – D1 – P1.

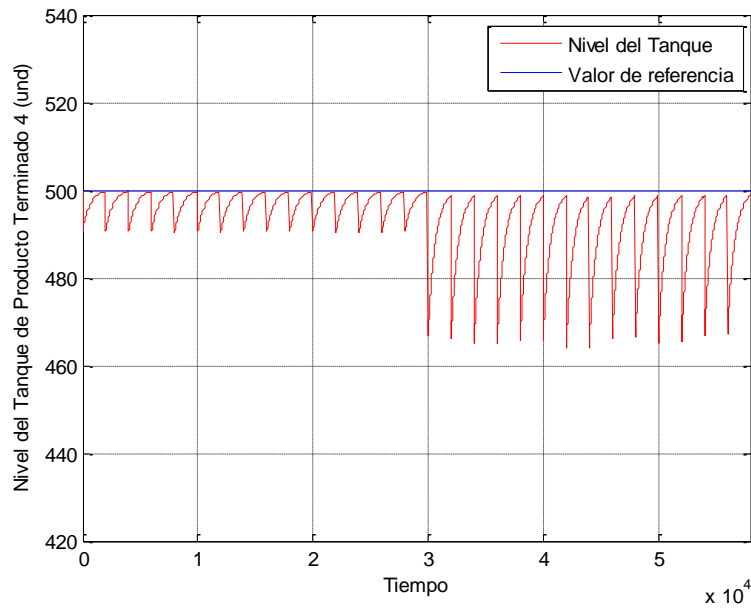


Ilustración 53 Variable PT 4 con PID en el proceso FFS – D1 – P1.

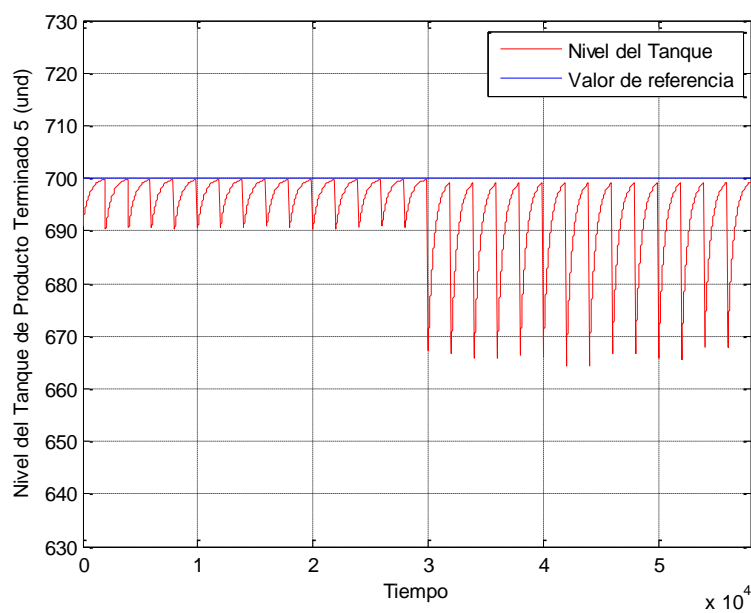


Ilustración 54 Variable PT 5 con PID en el proceso FFS – D1 – P1.

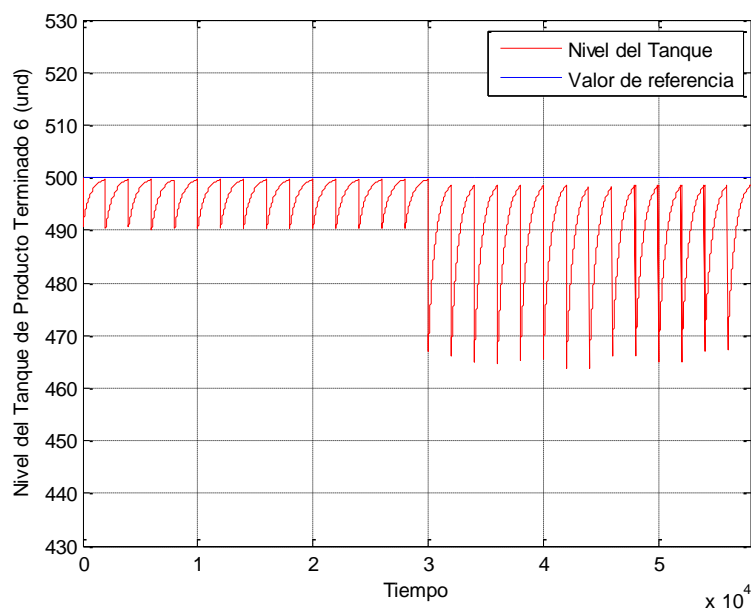


Ilustración 55 Variable PT 6 con PID en el proceso FFS – D1 – P1.

### Proceso Flexible Flow Shop con estrategia avanzada de control (DMC)

La Ilustración 56, Ilustración 57, Ilustración 58, Ilustración 59, Ilustración 60 e Ilustración 61 representan los resultados obtenidos en los productos terminados 1, 2, 3, 4, 5 y 6, respectivamente. Se evidencia un comportamiento oscilatorio en torno al valor solicitado, sin alejarse del valor de referencia.

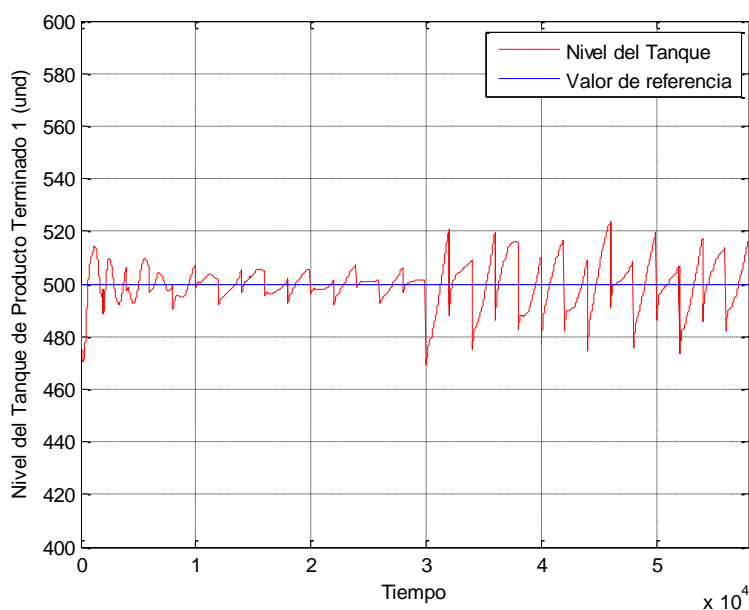


Ilustración 56 Variable PT 1 con DMC en el proceso FFS – D1 – P1.

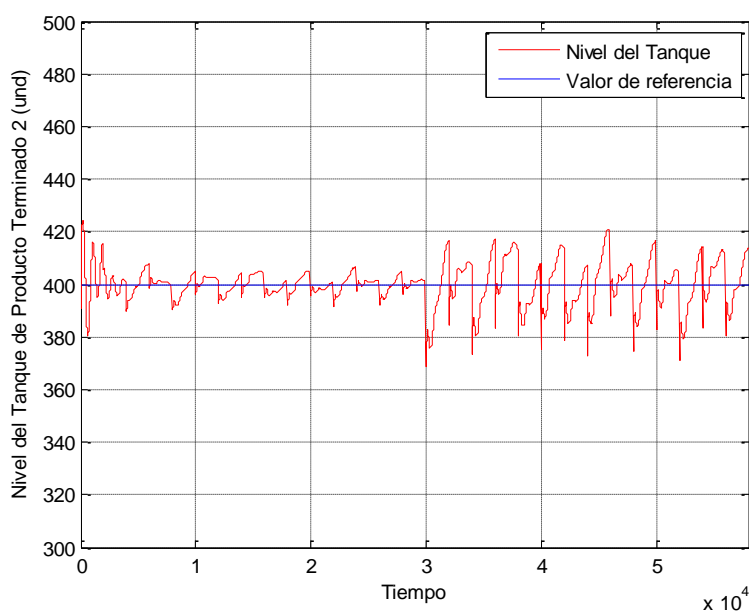


Ilustración 57 Variable PT 2 con DMC en el proceso FFS – D1 – P1.



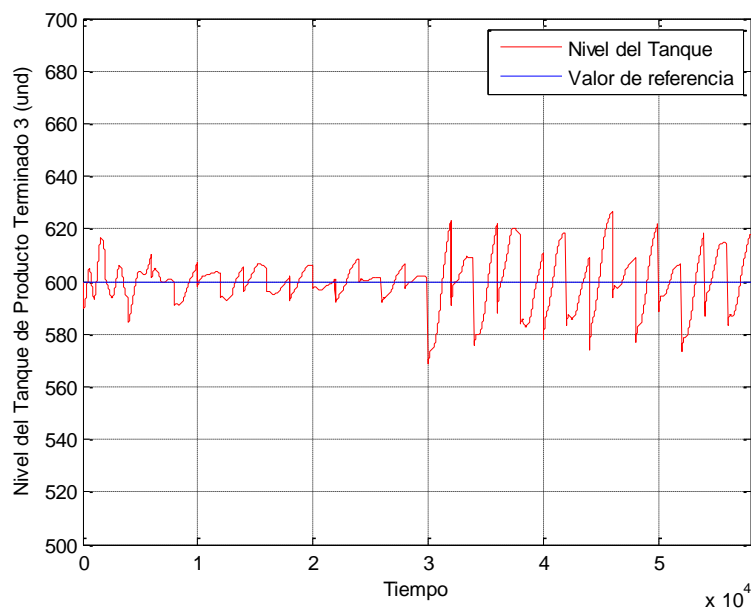


Ilustración 58 Variable PT 3 con DMC en el proceso FFS – D1 – P1.

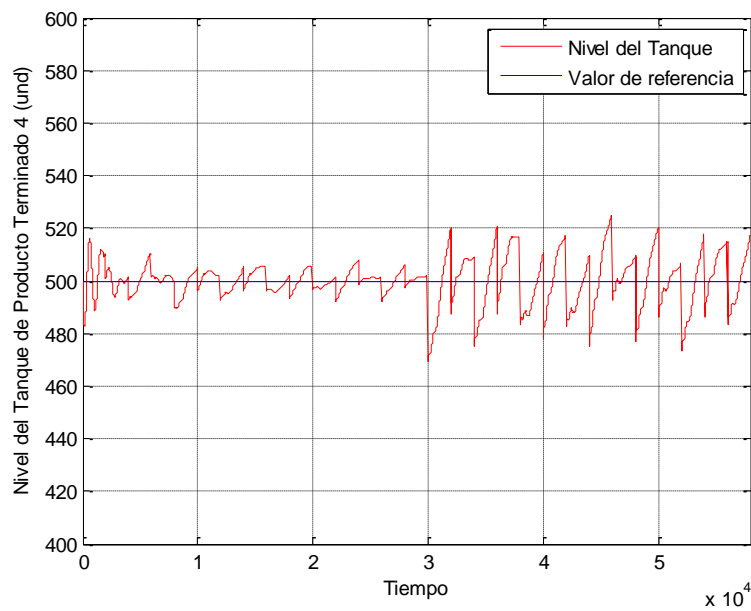


Ilustración 59 Variable PT 4 con DMC en el proceso FFS – D1 – P1.

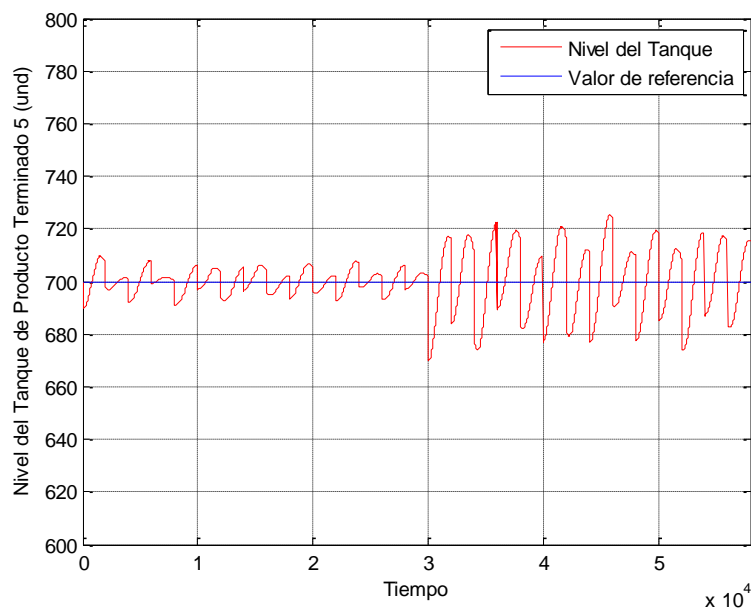


Ilustración 60 Variable PT 5 con DMC en el proceso FFS – D1 – P1.

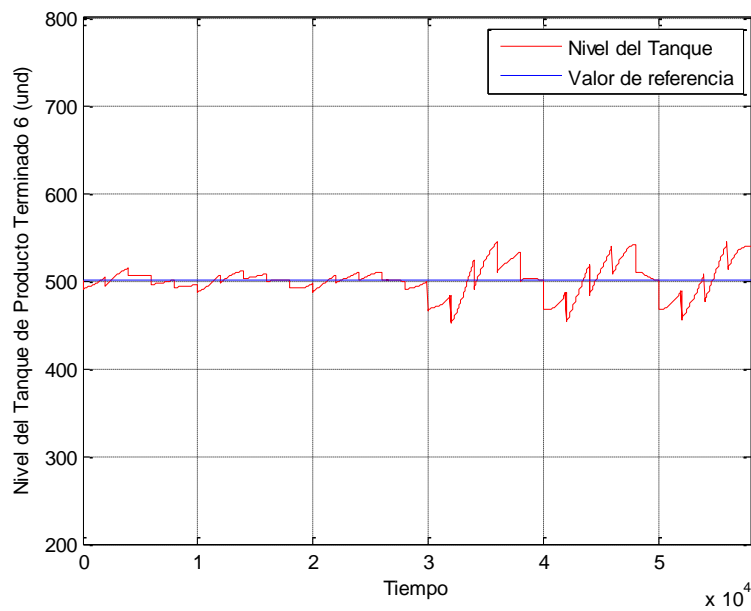


Ilustración 61 Variable PT 6 con DMC en el proceso FFS – D1 – P1.

### 8.3. Diseño de experimentos

Con fin de identificar las condiciones óptimas de operación de los sistemas de almacenamiento, en este segmento se analizan los factores que intervienen en el mismo, mediante un diseño de experimentos que pruebe el comportamiento del sistema de inventarios bajo diferentes condiciones de operación. Los factores involucrados en el diseño experimental son detallados en la *Tabla 4*.

Factores		Tipo	Niveles	Nomenclatura
A	Tipo de demanda (TD)	Categórico	Tipo 1	-1
			Tipo 2	0
			Tipo 3	1
B	Amplitud de demanda (AD)	Continuo	Amplitud tipo 1	-1
			Amplitud tipo 2	0
			Amplitud tipo 3	1
C	Lead Time (LT)	Continuo	Alto	1
			Bajo	0
D	Estrategia (E)	Categórico	Alto	1
			Bajo	0

Tabla 4 Factores para el diseño de experimentos.

Los niveles de los factores A y B son descritos en la sección 4.2.3, los del factor C se establecen como alto y bajo según el valor medio de la distribución triangular descrita en la sección 4.3 y el factor D determina categóricamente su nivel alto para el uso de la estrategia DMC y bajo para la estrategia PID. La variable de respuesta del experimento es la suma de los valores absolutos de los errores (IAE), el cual incluirá todos los lazos de control en el sistema de almacenamiento [26], como se muestra en la ecuación (90).

$$IAE = \int |e| dt \quad (90)$$

Este análisis cuantitativo permite realizar un seguimiento de la señal controlada con respecto a su valor de referencia (set point), es decir, permite identificar cuantas unidades estuvieron por fuera de lo deseado en el sistema de inventarios. El diseño de experimentos se realizará en esta sección para los procesos Job Shop y Flexible Flow Shop.

### 8.3.1. Diseño de experimentos proceso Job Shop

La secuencia operacional y sus resultados son expuestos en la *Tabla 5*.

JS				
TD	AD	LT	E	IAE
-1	-1	0	0	7565
0	-1	0	0	8143
1	-1	0	0	7594
-1	0	0	0	7622
0	0	0	0	8234
1	0	0	0	7685
-1	1	0	0	7675
0	1	0	0	8324
1	1	0	0	7768
-1	-1	1	0	7724
0	-1	1	0	8316
1	-1	1	0	7768
-1	0	1	0	7781
0	0	1	0	8407
1	0	1	0	7859
-1	1	1	0	7834
0	1	1	0	8498
1	1	1	0	7942
-1	-1	0	1	4609
0	-1	0	1	4939
1	-1	0	1	4748
-1	0	0	1	4635
0	0	0	1	4962
1	0	0	1	4781
-1	1	0	1	4650
0	1	0	1	5000
1	1	0	1	4800
-1	-1	1	1	4664
0	-1	1	1	5000
1	-1	1	1	4805
-1	0	1	1	4691
0	0	1	1	5023
1	0	1	1	4837
-1	1	1	1	4706
0	1	1	1	5062
1	1	1	1	4857

Tabla 5 Secuencia operacional diseño de experimentos proceso JS

Con el fin de identificar los factores e interacciones significativos en el control de los sistemas de almacenamiento se desarrolla un análisis de varianza (ANOVA) mostrado en la *Tabla 6*, en donde se evidencias los factores y las interacciones significativas.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:TD	1,51866E6	2	759330,	6833967,13	0,0000
B:AD	64195,7	2	32097,9	288880,71	0,0000
C:LT	115600,	1	115600,	1040399,87	0,0000
D:E	8,70178E7	1	8,70178E7	783160125,81	0,0000
INTERACCIONES					
AB	2493,94	4	623,486	5611,37	0,0000
AC	168,0	2	84,0	756,00	0,0000
AD	213327,	2	106663,	959970,88	0,0000
BD	16069,1	2	8034,53	72310,74	0,0000
CD	27666,8	1	27666,8	249000,97	0,0000
ABD	975,278	4	243,819	2194,37	0,0000
ACD	74,8889	2	37,4444	337,00	0,0000
RESIDUOS	1,33333	12	0,111111		
TOTAL (CORREGIDO)	8,8977E7	35			

Tabla 6 ANOVA proceso JS.

Los supuestos que validan la información suministrada por el ANOVA son probados a continuación.

#### NORMALIDAD

Los valores residuales del proceso son mostrados en la *Ilustración 62*, en donde se evidencia una distribución normal.

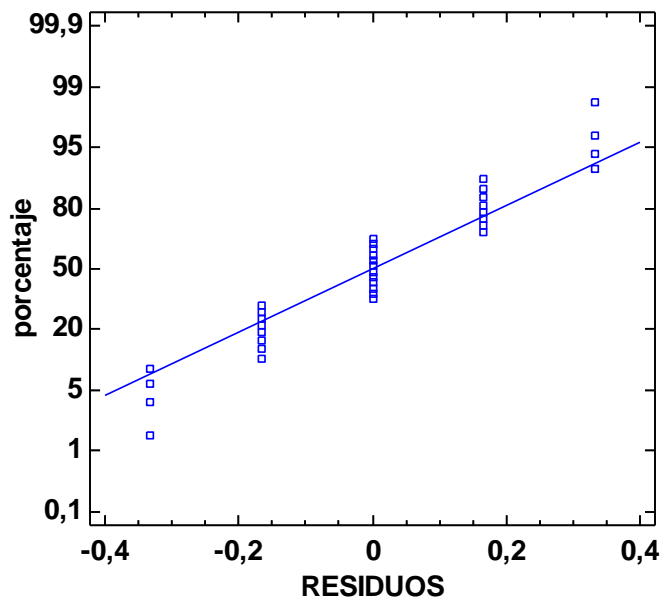


Ilustración 62 Gráfico probabilidad normal proceso JS

## HOMOCEASTICIDAD

### Factor A: Tipo de demanda.

La *Ilustración 63* representa el análisis gráfico para la prueba de homocedasticidad del factor A, en donde se evidencia una varianza homogénea en cada nivel.

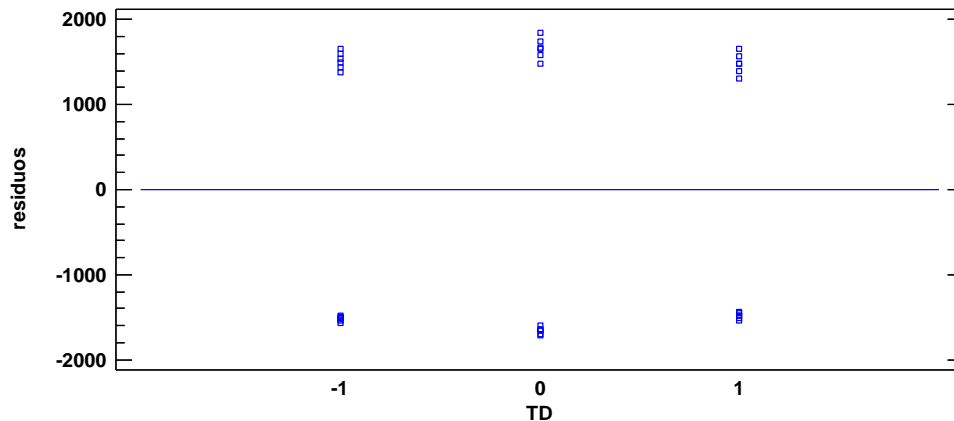


Ilustración 63 Homocedasticidad del factor A en el proceso JS.

Se verifica el resultado con la prueba Barlett, en donde el valor de prueba se estima 1,00486 y el valor P es determinado en 0,925953, confirmando de esta manera la homocedasticidad de los residuos del factor A.

### Factor B: Amplitud de la demanda.

La *Ilustración 64* representa el análisis gráfico para la prueba de homocedasticidad del factor B, en donde se evidencia una varianza homogénea en cada nivel.

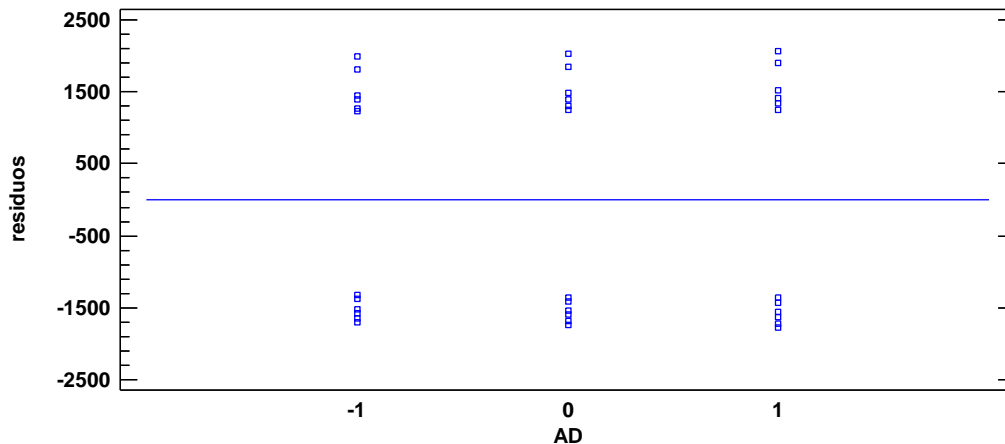


Ilustración 64 Homocedasticidad del factor B en el proceso JS.

Se corrobora el resultado con la prueba cuantitativa Barlett, el valor de prueba se estima 1,00039 y el valor P es determinado en 0,993905, confirmando la homocedasticidad de los residuos del factor B.

#### Factor B: Lead Time.

La *Ilustración 65* representa el análisis gráfico para la prueba de homocedasticidad del factor C, en donde se evidencia una varianza homogénea en cada nivel.

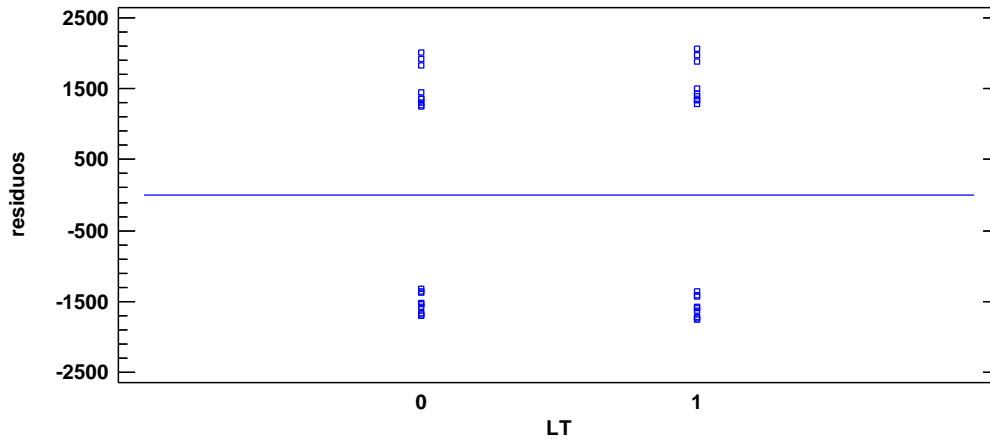


Ilustración 65 Homocedasticidad del factor C en el proceso JS.

Se comprueba el resultado con la prueba Barlett, en donde el valor de prueba se estima 1,00062 y el valor P es determinado en 0,886197, confirmando homocedasticidad de los residuos del factor C.

#### Factor D: Estrategia.

La *Ilustración 66* representa el análisis gráfico para la prueba de homocedasticidad del factor D, en donde se evidencia una varianza homogénea en cada nivel.

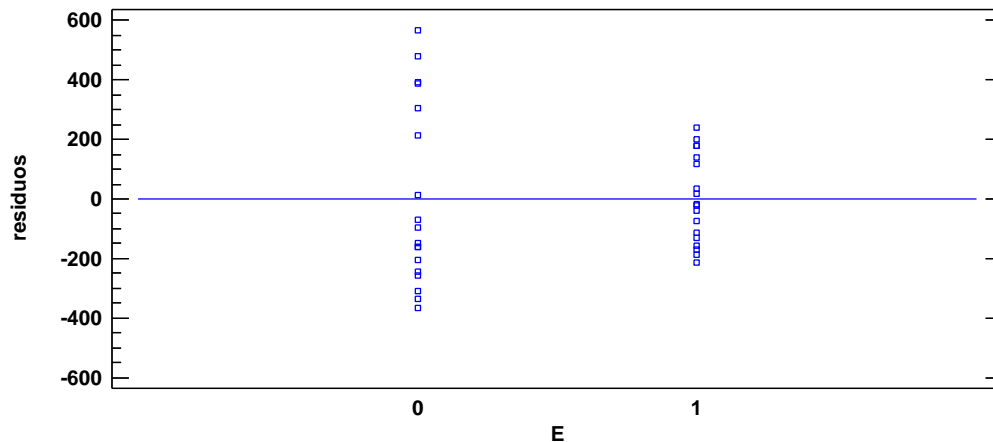


Ilustración 66 Homocedasticidad del factor D en el proceso JS.

Se verifica el resultado con la prueba Barlett, el valor de prueba se estima 1,27816 y el valor P es determinado en 0,00441057, confirmando de esta manera la homocedasticidad de los residuos del factor D.

## INDEPENDENCIA

La *Ilustración 67* expone los residuos según la secuencia de operación, evidenciando independencia en los datos, es decir, las observaciones que no muestran tendencia siendo aleatorias.

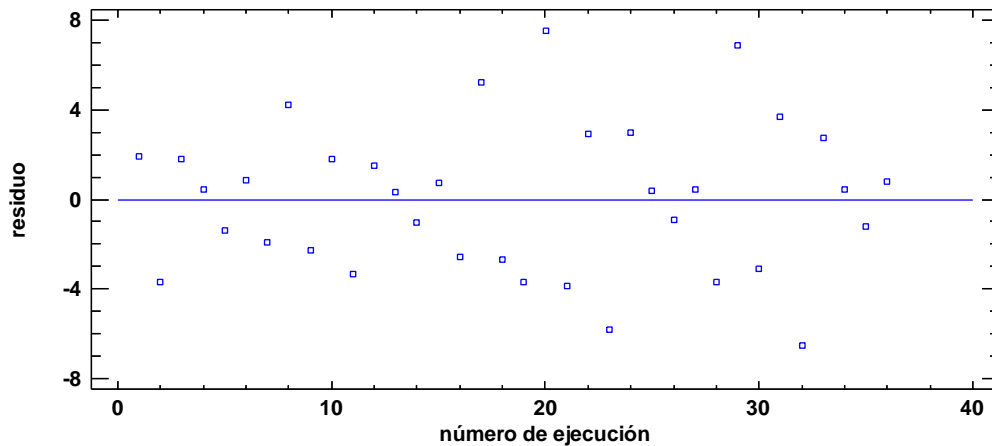


Ilustración 67 Independencia proceso JS.

## SUPERFICIES DE RESPUESTA

La superficie de respuesta estimada para el proceso Job Shop con demanda tipo 1, bajo la estrategia 1 es expuesto en la *Ilustración 68*. Se evidencia un valor mínimo para el IAE cuando la amplitud de la demanda está en nivel (-1), con lead time (-1) y un valor máximo cuando la amplitud de la demanda está en nivel (1), con lead time (1).

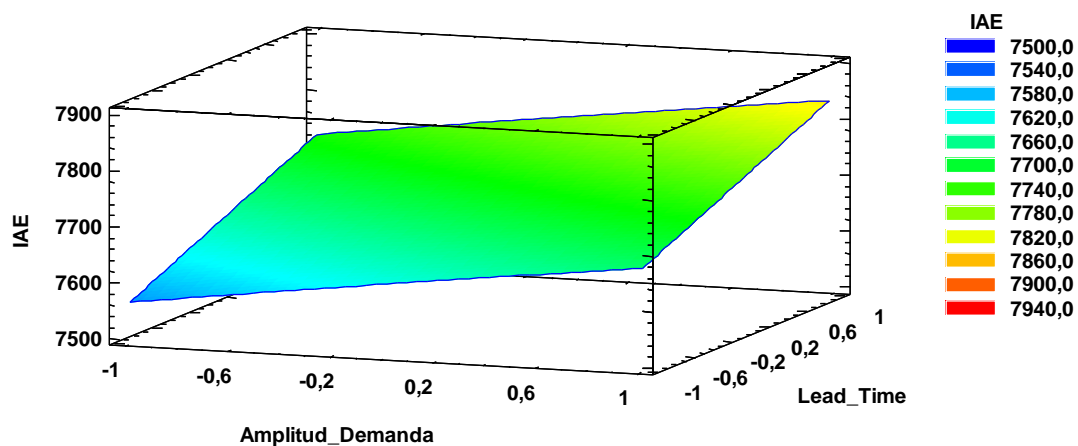


Ilustración 68 Superficie de respuesta JS-TD1-E1



La superficie de respuesta para este proceso con demanda tipo 2, estrategia 1 es expuesto en la *Ilustración 69*. Se evidencia un comportamiento del IAE superior 7940, oscilando entre 8100 y 8500 en sus vértices superior e inferior; también indicando que a mayor lead time y amplitud en la demanda, el IAE es mayor en el sistema.

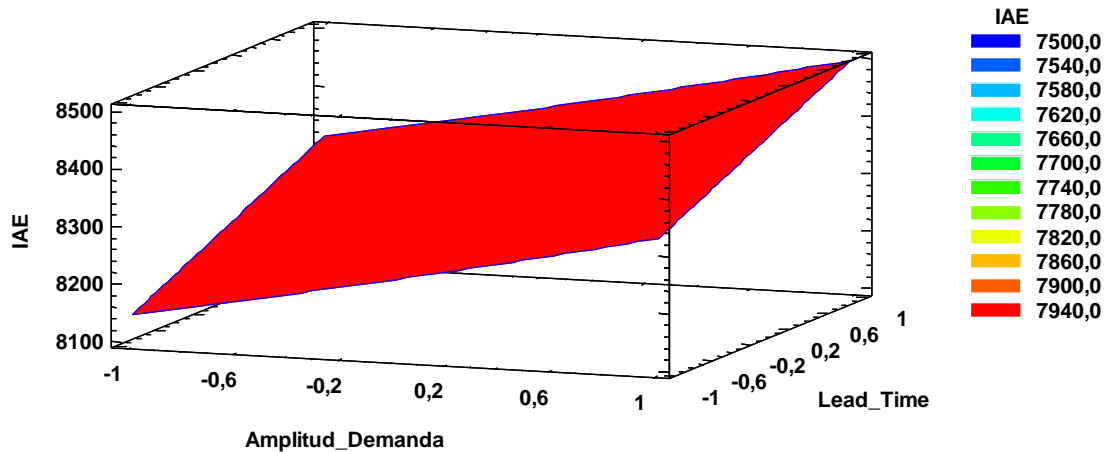


Ilustración 69 Superficie de respuesta JS-TD2-E1

La estimación de la superficie de respuesta para el proceso con demanda tipo 3, bajo la estrategia 1 es mostrado en la *Ilustración 70*. Se evidencia un valor mínimo para el IAE cuando la amplitud de la demanda está en nivel y lead time en (-1) y un valor máximo cuando la amplitud de la demanda está en nivel y lead time (1).

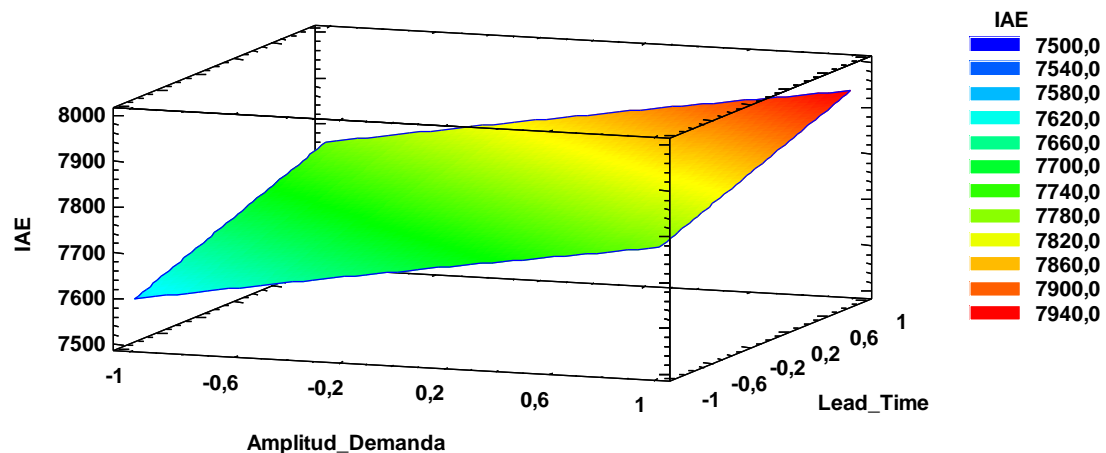


Ilustración 70 Superficie de respuesta JS-TD3-E1

La *Ilustración 71*, *Ilustración 72* e *Ilustración 73* muestran la superficie de respuesta estimada en el proceso Job Shop para la estrategia DMC bajo las condiciones de demanda 1, 2 y 3 respectivamente. En estas ilustraciones se evidencia un comportamiento del IAE variante en rangos bajos, no obstante, los valores mínimos siguen estableciéndose en los niveles -1 y los máximos en 1 para la amplitud de la demanda y el lead time.

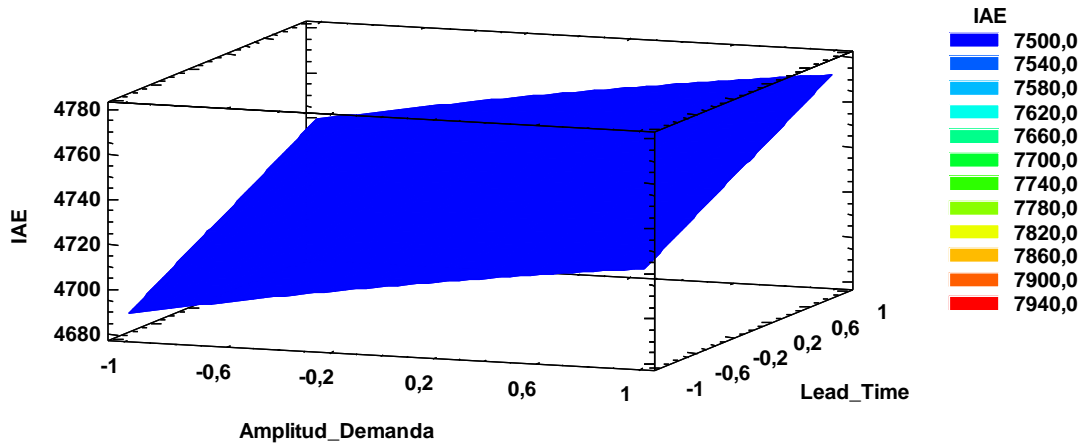


Ilustración 71 Superficie de respuesta JS-TD1-E2

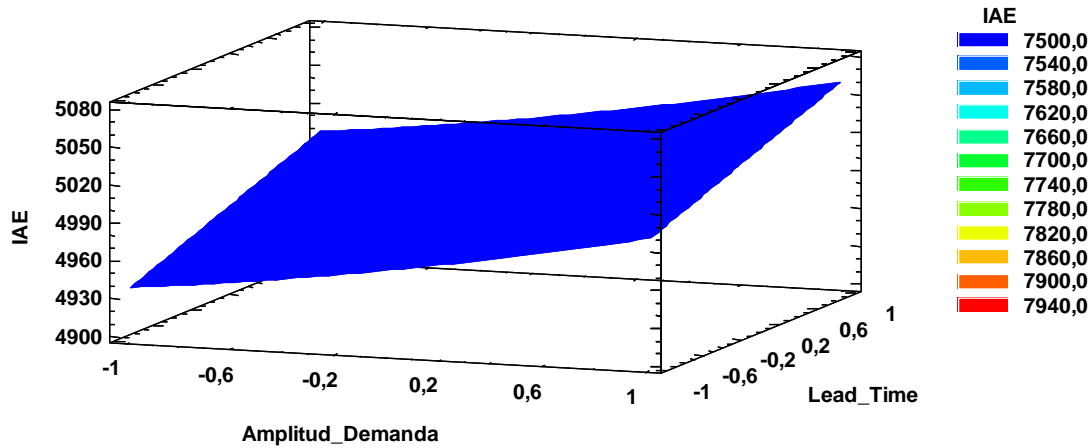


Ilustración 72 Superficie de respuesta JS-TD2-E2

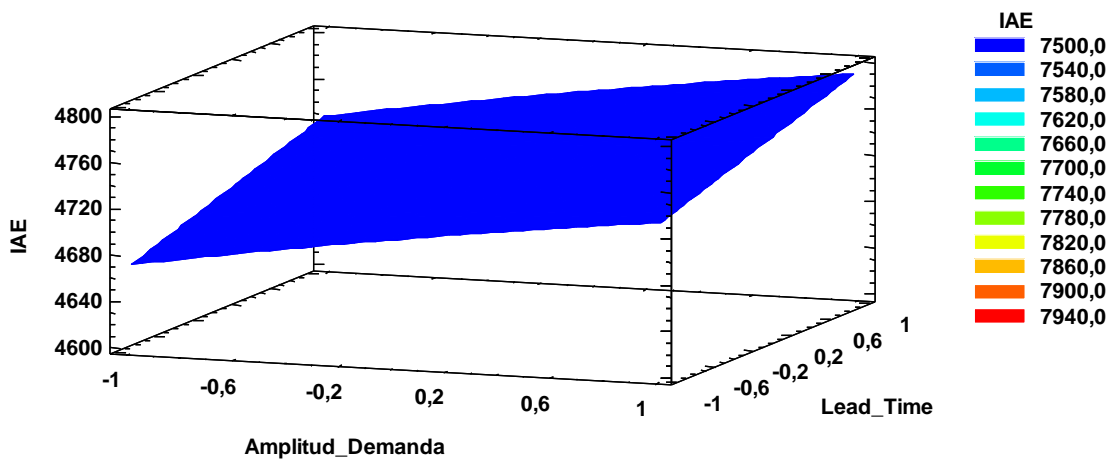


Ilustración 73 Superficie de respuesta JS-TD3-E2

### 8.3.2. Diseño de experimentos proceso Flexible Flow Shop

La secuencia operacional y sus resultados son expuestos en la.

FFS				
TD	AD	LT	E	IAE
-1	-1	0	0	11111
0	-1	0	0	12188
1	-1	0	0	11126
-1	0	0	0	11252
0	0	0	0	12387
1	0	0	0	11325
-1	1	0	0	11402
0	1	0	0	12595
1	1	0	0	11528
-1	-1	1	0	11111
0	-1	1	0	12202
1	-1	1	0	11159
-1	0	1	0	11252
0	0	1	0	12401
1	0	1	0	11358
-1	1	1	0	11402
0	1	1	0	12610
1	1	1	0	11561
-1	-1	0	1	5046
0	-1	0	1	5899
1	-1	0	1	7590
-1	0	0	1	5093
0	0	0	1	5980
1	0	0	1	7614
-1	1	0	1	5142
0	1	0	1	6055
1	1	0	1	7712
-1	-1	1	1	5056
0	-1	1	1	5908
1	-1	1	1	7615
-1	0	1	1	5102
0	0	1	1	5988
1	0	1	1	7639
-1	1	1	1	5151
0	1	1	1	6064
1	1	1	1	7737

Tabla 7 Secuencia operacional diseño de experimentos proceso FFS

Con el fin de identificar los factores e interacciones significativos en el control de los sistemas de almacenamiento se desarrolla un análisis de varianza (ANOVA) mostrado en la *Tabla 8*, en donde se evidencias los factores y las interacciones significativas.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:TD	1,14561E7	2	5,72804E6	68736480,21	0,0000
B:AD	362604,	2	181302,	2175620,95	0,0000
C:LT	2040,03	1	2040,03	24480,33	0,0000
D:E	2,64491E8	1	2,64491E8	3173886520,70	0,0000
INTERACCIONES					
AB	9181,11	4	2295,28	27543,33	0,0000
AC	945,056	2	472,528	5670,33	0,0000
AD	1,35585E7	2	6,77926E6	81351055,99	0,0000
BD	88221,6	2	44110,8	529329,24	0,0000
CD	4,69444	1	4,69444	56,33	0,0000
ABD	2573,44	4	643,361	7720,33	0,0000
ACD	132,722	2	66,3611	796,33	0,0000
RESIDUOS	1,0	12	0,0833333		
TOTAL (CORREGIDO)	2,89971E8	35			

Tabla 8 ANOVA proceso FFS.

Los supuestos que validan la información suministrada por el ANOVA son probados a continuación.

### NORMALIDAD

Los valores residuales del proceso son mostrados en la *Ilustración 62*, en donde se evidencia una distribución normal.

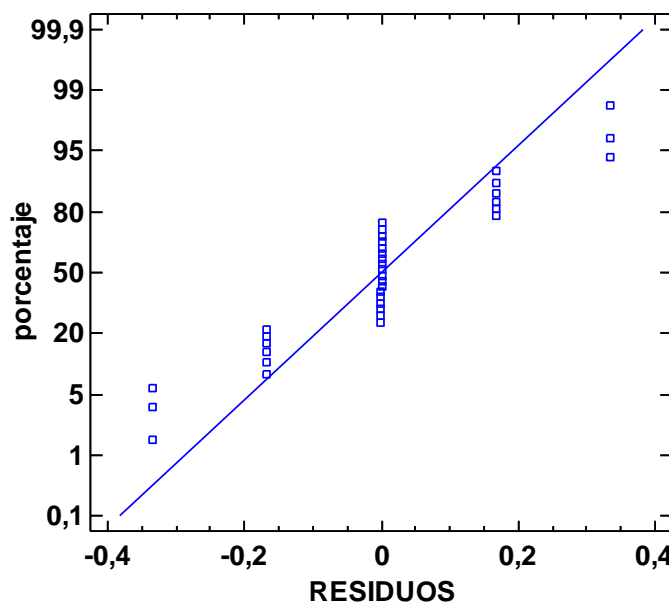


Ilustración 74 Gráfico probabilidad normal proceso FFS

## HOMOCEASTICIDAD

### Factor A: Tipo de demanda.

La *Ilustración 75* representa el análisis gráfico para la prueba de homocedasticidad del factor A, en donde se evidencia una varianza homogénea en cada nivel.

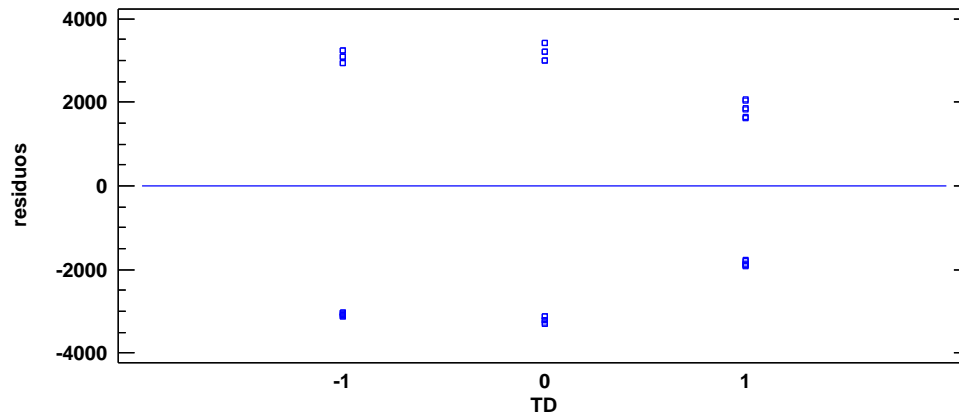


Ilustración 75 Homocedasticidad del factor A en el proceso FFS.

Se corrobora el resultado con la prueba cuantitativa Barlett, el valor de prueba se estima 1,11461 y el valor P es determinado en 0,178935, confirmando la homocedasticidad de los residuos del factor A.

### Factor B: Amplitud de demanda.

La *Ilustración 76* expone el análisis gráfico para la prueba de homocedasticidad del factor A, en donde se evidencia una varianza homogénea en cada nivel.

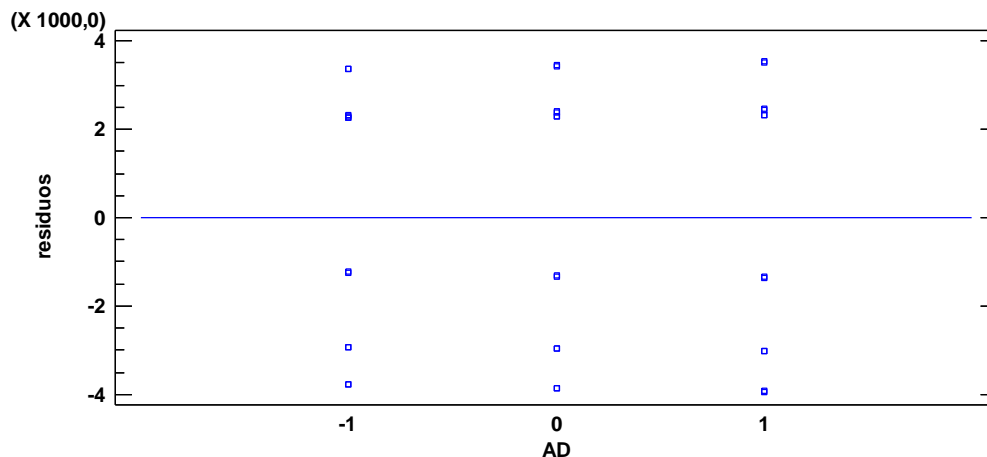


Ilustración 76 Homocedasticidad del factor B en el proceso FFS.

Se corrobora el resultado con la prueba cuantitativa Barlett, el valor de prueba se estima 1,0006 y el valor P es determinado en 0,990588, confirmando la homocedasticidad de los residuos del factor B.

### Factor C: Lead Time

La *Ilustración 75 Homocedasticidad del factor A en el proceso FFS*. *Ilustración 77* representa el análisis gráfico para la prueba de homocedasticidad del factor C, en donde se evidencia una varianza homogénea en cada nivel.

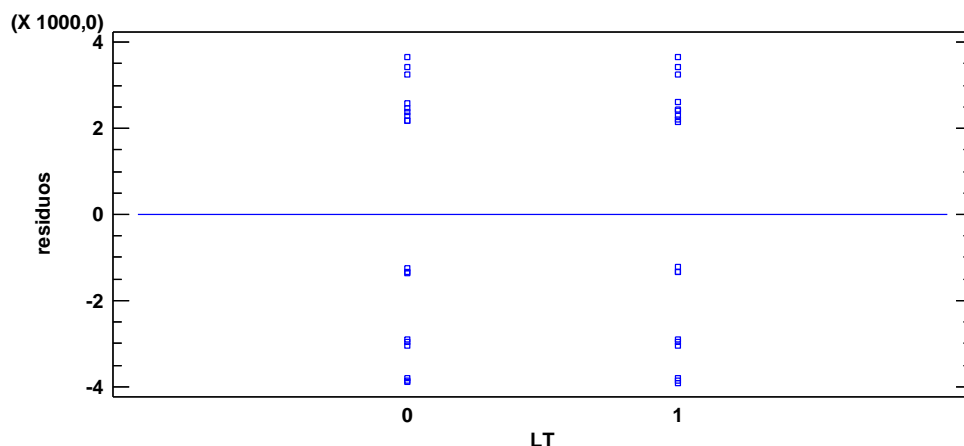


Ilustración 77 Homocedasticidad del factor C en el proceso FFS.

Se corrobora el resultado con la prueba cuantitativa Barlett, el valor de prueba se estima 1,0 y el valor P es determinado en 0,997727, confirmando la homocedasticidad de los residuos del factor C.

### Factor D: Estrategia

La *Ilustración 78* representa el análisis gráfico para la prueba de homocedasticidad del factor C, en donde se evidencia una varianza homogénea en cada nivel.

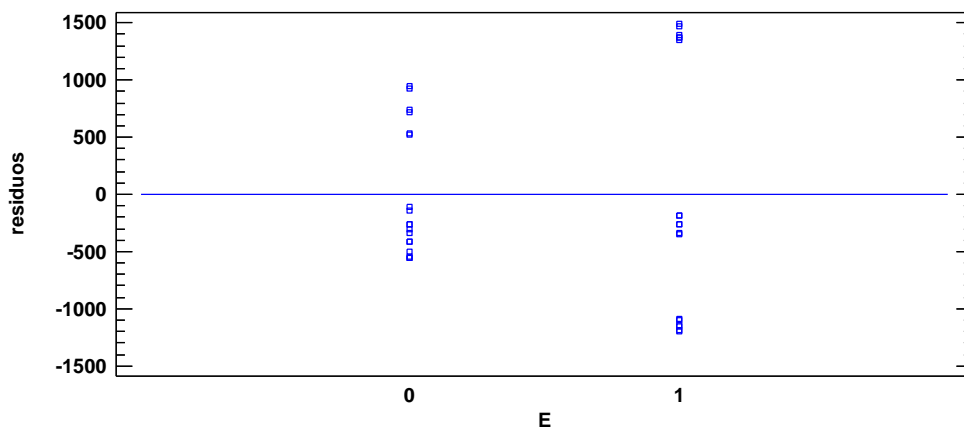


Ilustración 78 Homocedasticidad del factor D en el proceso FFS.

Se corrobora el resultado con la prueba cuantitativa Barlett, el valor de prueba se estima 1,23516 y el valor P es determinado en 0,00826064, confirmando la homocedasticidad de los residuos del factor D.

## INDEPENDENCIA

La *Ilustración 79* *Ilustración 67* expone los residuos según la secuencia de operación, evidenciando independencia en los datos, es decir, las observaciones que no muestran tendencia siendo aleatorias.

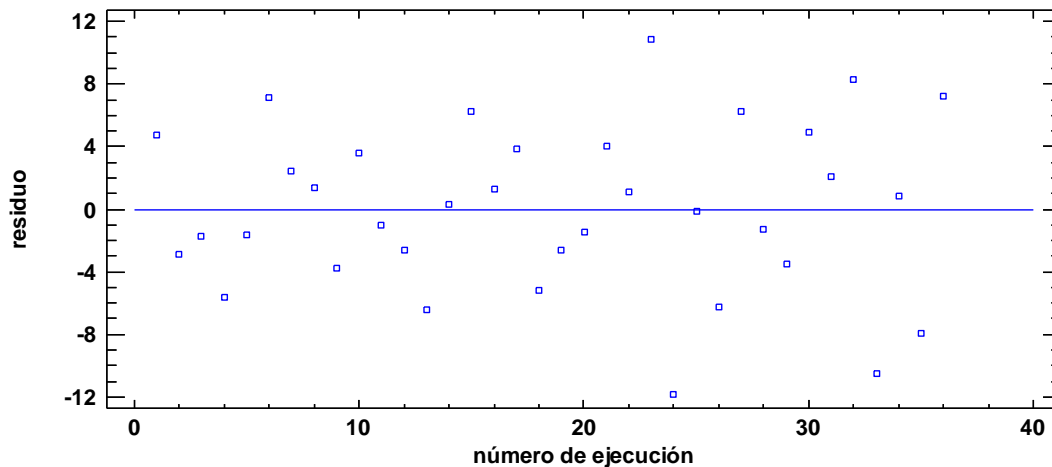


Ilustración 79 Independencia proceso FFS.

## SUPERFICIES DE RESPUESTA

La superficie de respuesta estimada para el proceso Flexible Flow Shop con demanda tipo 1, bajo la estrategia 1 es expuesto en la *Ilustración 80*. Se evidencia un valor mínimo para el IAE cuando la amplitud de la demanda está en nivel (-1), con lead time (-1) y un valor máximo cuando la amplitud de la demanda está en nivel (1) con lead time (1).

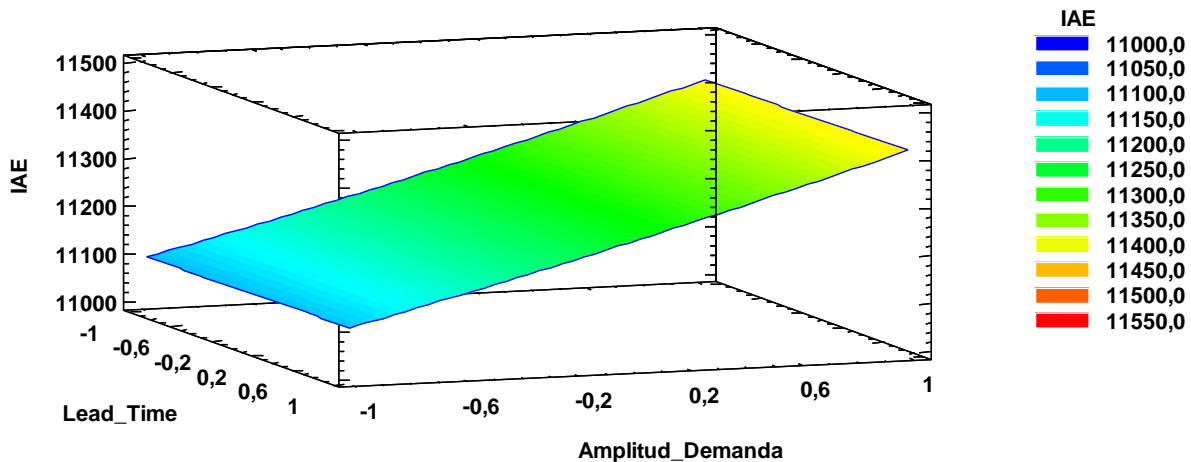


Ilustración 80 Superficie de respuesta FFS-TD1-E1

La superficie de respuesta para este proceso en condiciones de operación basadas en la demanda tipo 2 con la estrategia 1 de control es expuesto en la *Ilustración 81*. Se evidencia un valor para el IAE superior a 11550 unidades, evidenciando un valor superior cuando la amplitud de la demanda y el lead time son superiores.

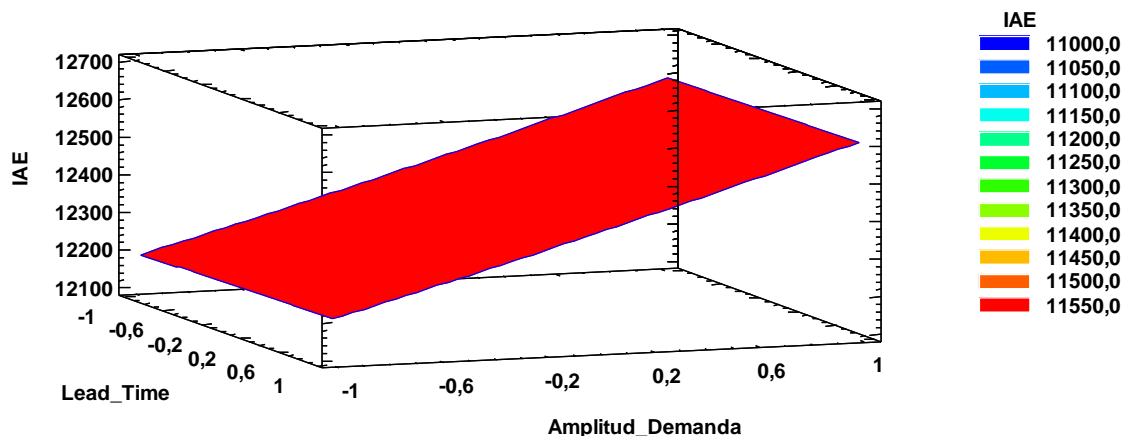


Ilustración 81 Superficie de respuesta FFS-TD2-E1

En la *Ilustración 82* se expone la estimación de la superficie de respuesta para el proceso Flexible Flow Shop con demanda tipo 3 bajo la estrategia 1, en esta grafica se evidencia un comportamiento ascendente en los valores del IAE, siendo el mínimo obtenido con el lead time y amplitud de demanda en niveles (-1) y (-1) y el máximo en niveles (1) y (1) respectivamente.

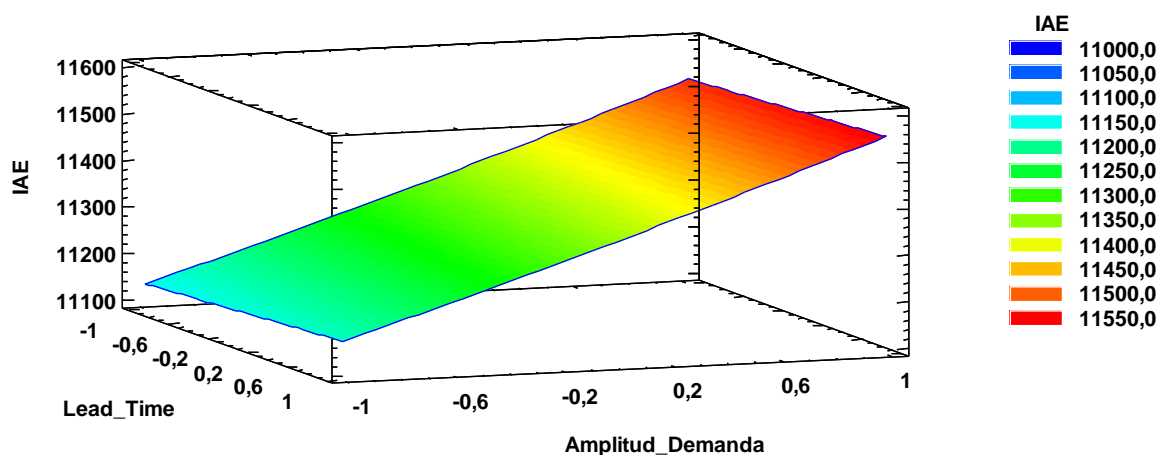


Ilustración 82 Superficie de respuesta FFS-TD3-E1

La superficie de respuesta del proceso Flexible Flow Shop bajo la estrategia 2 son mostradas en la *Ilustración 83*, *Ilustración 84* e *Ilustración 85*, para las condiciones de demanda 1, 2 y 3 respectivamente. En estas gráficas se nota un comportamiento del IAE menores a 11000, con valores en los niveles -1 y los máximos en 1 para los factores: amplitud de la demanda y lead time.



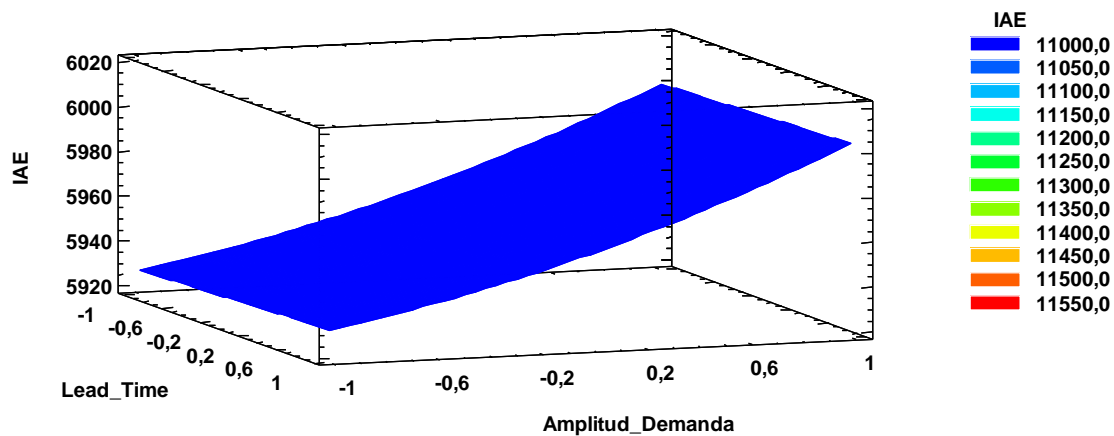


Ilustración 83 Superficie de respuesta FFS-TD1-E2

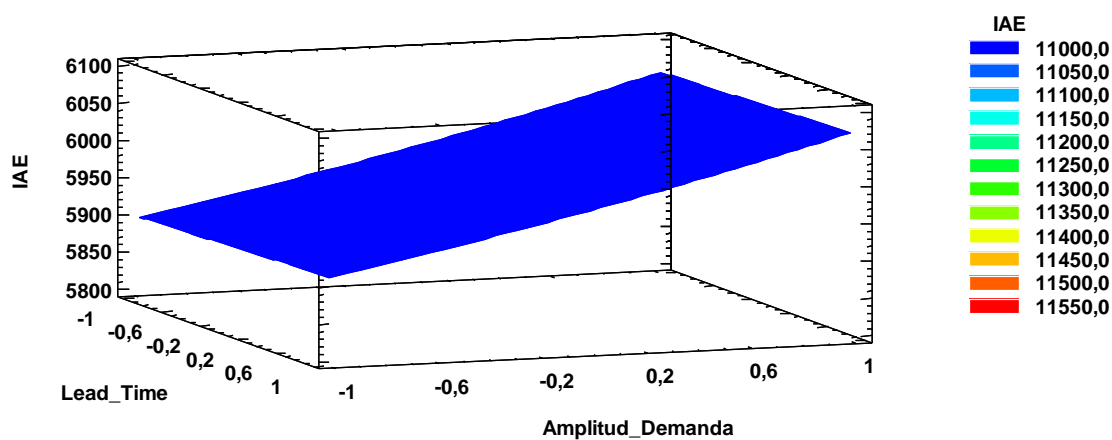


Ilustración 84 Superficie de respuesta FFS-TD2-E2

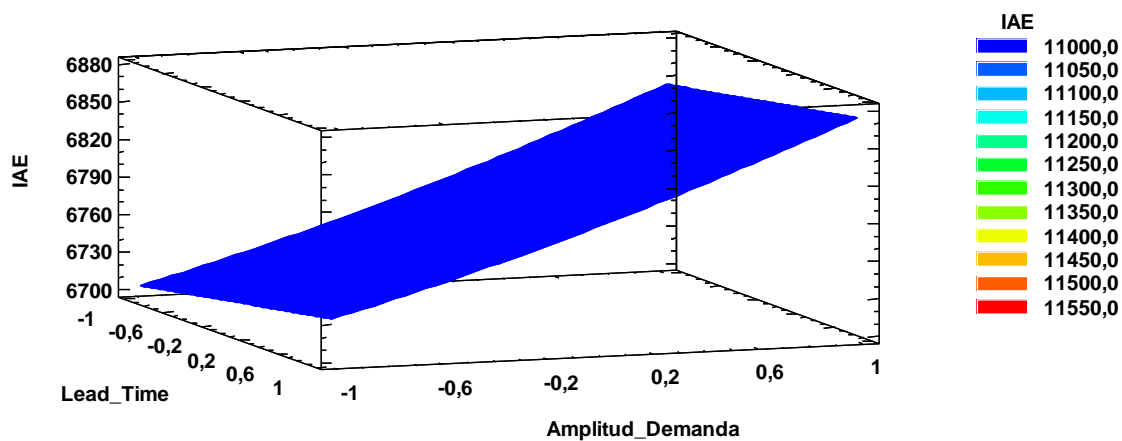


Ilustración 85 Superficie de respuesta FFS-TD3-E2

Se establece que el valor absoluto del error es mayor en la estrategia de control PID con respecto a la estrategia DMC. Esta tendencia de comportamiento es generalizada en los procesos Job Shop y Flexible Flow Shop, no obstante, las superficies de respuesta mostradas en esa sección evidencian diferencias en los rangos de IAE en los procesos, frente a cambios de los factores establecidos.

## 8.4. Costos

En la sección 5 se desarrolló un modelo de costos asociado a sistemas de almacenamiento, el cual contempla los valores para los siguientes componentes: faltantes de producto terminado, almacenamiento por unidad de materia prima, producto en proceso y producto terminado, adicionalmente, se considera la escala de compra de materia prima y la emisión de órdenes de compra. El modelo de costos mencionado es usado como indicador para la evaluación de desempeño de las estrategias de control implementadas.

En esta sección se analiza el sobrecosto del sistema de almacenamiento basándose en la IAE, dado que el exceso de inventario es penalizado por almacenamiento de unidades que no se necesitan- La ausencia o faltantes fue penalizado doble, dado que la disposición de almacenamiento es la misma y se penaliza el estrés que le causa al sistema por acercarse al límite no deseado. La *Ilustración 86* describe el análisis de costos realizado con base al IAE.

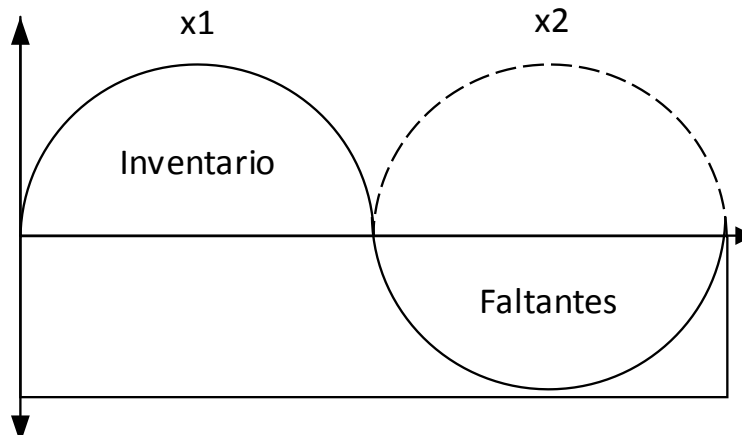


Ilustración 86 Análisis de costos con la IAE.

La *Tabla 9* muestra los valores de IAE para cada estrategia y lazo de control en el proceso Job Shop, estos valores hacen referencia a las unidades que estuvieron por fuera de lo deseado en el sistema de inventarios por lazo de control, como se explicó en la sección 8.3. Adicionalmente, en esta tabla se exponen los costos de almacenamiento asociados a los valores adicionales a los contemplados por los pronósticos en un  $t=58.000$  unidades de tiempo. Los costos son determinados a partir de la función objetivo expuesto en la ecuación (33), en donde para fines de esta investigación se establecen valores de \$7, \$5 y \$10 para el almacenamiento de las materias primas, productos en

proceso y productos terminados respectivamente, se asumen costos adicionales de compra de \$1 en escala pequeñas y de \$1,2 en escala grande, los faltantes son penalizados con \$1000 y costo de generación de orden de compra es despreciable. Un ejemplo de este análisis, para el proceso Job Shop, bajo la estrategia clásica, para la demanda tipo 1 y perturbación tipo 1, se muestra a continuación:

$$CT_{Inventarios} = \sum_{j=1}^J \{ (O_{jt} * CO_j) + (I_{jt}^R * C_{jt}) + (X_{jt} * C'_{jt} * a_{jt}) + (Y_{jt} * C''_{jt} * a_{jt}) \} \\ + \sum_{v_s}^V (I_{v_{st}}^W * C_{v_{st}}) + \sum_i^i \{ (I_{it}^F * C_{it}) + (B_{it}^F * M_{it}) \}$$

$$CT_{Inventarios} = \{ (957 + 1067 + 718) * \$7 \} + \{ (957 + 1067 + 718) * \$1 * 1 \} \\ + \{ (1057 + 686 + 761 + 864) * \$5 \} + \{ (591 + 864) * \$10 \} \\ + \{ (0) * \$1000 \}$$

$$CT_{Inventarios} = \$53.326$$

Este resultado es resaltado en amarillo dentro de la *Tabla 9*. De esta manera se calculan los costos de inventarios en los análisis restantes de esta sección y son base para el análisis gráfico de los mismos.

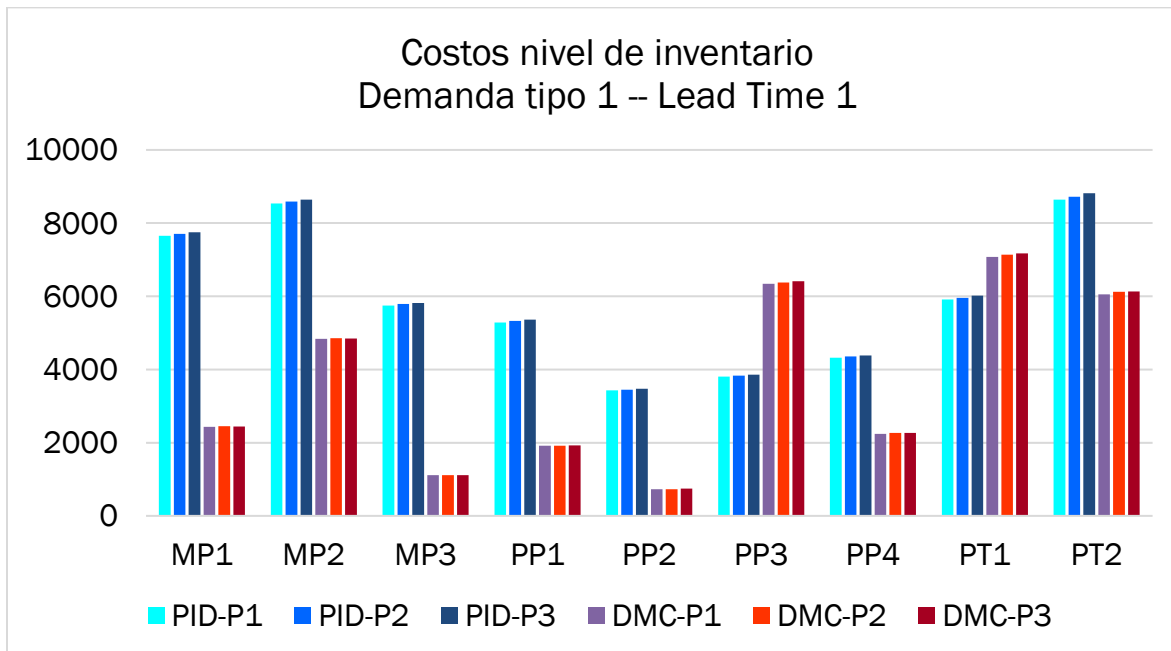


Ilustración 87 Costos del sistema de almacenamiento JS – D1 – L1.

Proceso Job Shop – Demanda Tipo 1 – Lead Time 1												
Factor	PID			DMC			PID			DMC		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
MP1	957	963	969	304	306	305	7656	7704	7752	2432	2448	2440
MP2	1067	1074	1080	605	607	606	8536	8592	8640	4840	4856	4848
MP3	718	724	727	139	139	139	5744	5792	5816	1112	1112	1112
PP1	1057	1065	1072	384	383	385	5285	5325	5360	1920	1915	1925
PP2	686	690	695	146	146	149	3430	3450	3475	730	730	745
PP3	761	766	772	1269	1275	1282	3805	3830	3860	6345	6375	6410
PP4	864	872	876	449	453	454	4320	4360	4380	2245	2265	2270
PT1	591	596	602	708	714	717	5910	5960	6020	7080	7140	7170
PT2	864	872	882	605	612	613	8640	8720	8820	6050	6120	6130
TOTAL	7565	7622	7675	4609	4635	4650	53326	53733	54123	32754	32961	33050

Tabla 9 Costos del sistema de almacenamiento JS – D1 – L1

La *Ilustración 87* expone los resultados de los costos de inventario obtenidos del proceso Job Shop, el diagrama de barras permite comparar los costos derivados de la implementación de la estrategia clásica o “PID” (en gama de azules) frente a los obtenidos con la estrategia avanzada DMC (en gama de rojos), evidenciado un mayor costo en la estrategia clásica en 7 de 9 lazos de control. El análisis de costo para el proceso flexible Flow Shop es realizado de manera análoga, los resultados son mostrados en la *Tabla 10*.

Proceso Flexible Flow Shop – Demanda Tipo 1 – Lead Time 1												
Factor	PID			DMC			PID			DMC		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
MP1	527	532	539	17	17	18	4216	4256	4312	136	136	144
MP2	533	539	546	11	11	11	4264	4312	4368	88	88	88
MP3	529	535	542	4	4	4	4232	4280	4336	32	32	32
PP1	494	499	506	131	132	134	2470	2495	2530	655	660	670
PP2	536	542	550	180	181	183	2680	2710	2750	900	905	915
PP3	545	551	558	305	305	309	2725	2755	2790	1525	1525	1545
PP4	535	540	547	184	184	187	2675	2700	2735	920	920	935
PP5	521	527	534	84	84	86	2605	2635	2670	420	420	430
PP6	510	515	523	47	47	49	2550	2575	2615	235	235	245
PP7	538	546	551	67	67	68	2690	2730	2755	335	335	340
PP8	544	554	557	75	76	76	2720	2770	2785	375	380	380
PP9	533	540	547	44	44	44	2665	2700	2735	220	220	220
PP10	528	535	542	22	22	22	2640	2675	2710	110	110	110
PP11	528	535	542	26	27	27	2640	2675	2710	130	135	135
PP12	543	552	557	17	18	18	2715	2760	2785	85	90	90
PT1	541	548	557	506	509	516	5410	5480	5570	5060	5090	5160
PT2	598	606	614	479	486	488	5980	6060	6140	4790	4860	4880
PT3	493	499	506	588	590	599	4930	4990	5060	5880	5900	5990
PT4	531	539	545	532	537	544	5310	5390	5450	5320	5370	5440
PT5	457	464	470	675	679	688	4570	4640	4700	6750	6790	6880
PT6	547	554	560	1052	1073	1071	5470	5540	5600	10520	10730	10710
TOTAL	11111	11252	11402	5046	5093	5142	76157	77128	78106	44486	44931	45339

Tabla 10 Costos del sistema de almacenamiento FFS – D1 – L1.

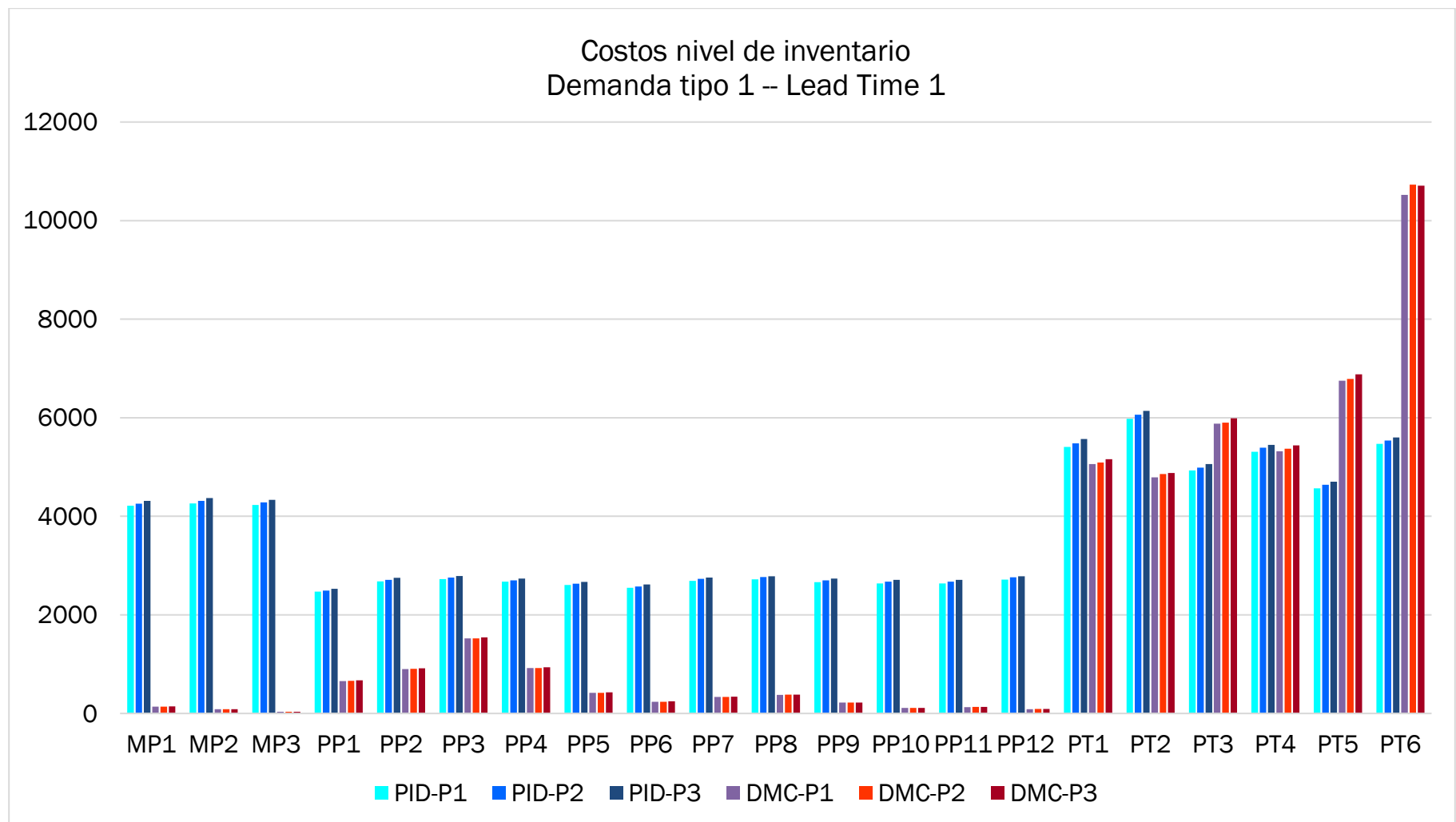


Ilustración 88 Costos del sistema de almacenamiento FFS – D1 – L1.

Los costos obtenidos en el tiempo de análisis fueron en global menores con la estrategia DMC con respecto a la estrategia PID, este comportamiento fue imperativo en todos los lazos de control con excepción de los lazos de producto terminado, no obstante, los costos totales del sistema son menores frente a una estrategia avanzada. Los anexos 39 y 40 referencian el análisis del comportamiento de las estrategias frente a los diferentes tipos de demanda, perturbación y lead time contemplados en esta investigación.

## 9. CONCLUSIONES

En esta investigación se diseñó una metodología de control de modelos dinámicos de inventarios, basada en la teoría de control predictivo, para la reducción de costo de inventarios en procesos con dinámicas de abastecimiento variables y demanda estocástica. Para esto, se inició con la caracterización y análisis del estado del arte entorno a los métodos de gestión de inventarios y teoría de control desarrollados, en la sección 2 se expone este análisis y se identifica la brecha investigativa existente, para dar solución a la problemática planteada en la sección 1.1. La brecha identificada hace referencia al abordaje de la problemática bajo la estrategia de control avanzado DMC. Partiendo de esta conclusión, en la sección 4 se establecieron las características de los procesos a controlar en esta investigación, contemplando sistemas Job Shop y Flexible Flow Shop, patrones de demanda del mercado, comportamiento del lead time, pronósticos de demanda, tipos de controladores, sensores, actuadores, entre otras características que se consideraron en pro de plantear un modelo cercano a la realidad de la operación de los procesos. Los sistemas para evaluación planteados fueron contruidos mediante modelos dinámicos que permitieron describir las etapas de abastecimiento, recibo, despacho, almacenamiento y entrega del sistema, como se evidencia en la sección 6. La capacidad para caracterizar el comportamiento de los sistemas de inventarios por parte de la modelación dinámica de los mismos, permitió la implementación de la metodología de predictiva DMC y una estrategia clásica con el objetivo de comprar el desempeño de las mismas, esto es explícito en la sección 7.

El análisis de desempeño de las estrategias de control fue realizada en la sección 8.1 para el sistema Job Shop y el sistema Flexible Flow Shop en el segmento 8.2, en donde se pudieron observar las características de respuesta de cada estrategia, frente a cambios en el set point y perturbaciones en el flujo de salida de los productos terminados. A partir de dicho análisis de desempeño, se concluye que la estrategia PID presenta comportamiento monotónico de estabilización en los niveles ante cambios de setpoint y perturbaciones, es decir, la respuesta obtenida en la estabilización de los niveles es regular. Por otra parte, la estrategia DMC gracias a su componente predictivo presenta una respuesta rápida de estabilización con oscilaciones entorno a el valor del setpoint, este comportamiento oscilatorio obedece a la naturaleza multi-variable del algoritmo, a la naturaleza integrante y altamente interactuante del proceso. La evaluación de desempeño de las estrategias implementadas, en lo concerniente a control de inventarios, fue cuantificado mediante la integral del valor absoluto del error (IAE), el cual mostró que DMC a pesar de presentar oscilación en la respuesta cuenta con un IAE menor al presentado por la estrategia basada en PIDs.

Con el fin de complementar la evaluación de desempeño, se realizó un diseño de experimentos con el fin de identificar las variables significativas en los sistemas de almacenamiento, como se muestra en la sección 8.3. Los factores que se incluyeron en el análisis fueron: tipo de demanda, amplitud de demanda o perturbación, lead time y tipo de estrategia (clásica o avanzada). A partir de un análisis de varianza (ANOVA) se

concluyó que la totalidad de los factores son estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 95%, imperando el tipo de estrategia de control como una variable decisiva en los niveles de inventario. Este resultado fue respaldado por la comprobación de los supuestos (normalidad, homocedasticidad e independencia). Adicionalmente, se obtuvo la superficie de respuesta de los sistemas frente a la variación de los factores considerados significativos para el proceso, a partir de las cuales se concluye que los factores en niveles bajos (Tipo de demanda 1, amplitud de demanda 1, lead time bajo y estrategia de control avanzada) responden a la cantidad mínima de inventario y en niveles altos (tipo de demanda 3, amplitud de demanda 3, lead time alto y estrategia PID) registran cantidades máximas de inventario, este resultado es el mismo para ambos tipos de sistemas evaluados (Job Shop y Flexible Flow Shop). Finalmente, se analizó el desempeño de las estrategias implementadas asociadas a los costos de almacenamiento en la sección 8.4, en donde se concluyó que costos globales la estrategia avanzada presenta costos menores a los presentados en la estrategia clásica.

De manera general los resultados del desempeño de las metodologías, permiten concluir que la estrategia DMC brinda una herramienta robusta, con una desviación menor en los inventarios solicitados e incurriendo en un costo inferior, a las dadas por estrategias clásicas como PID, esta conclusión de manera general es independiente del tipo de sistema de proceso en el que se esté implementado, no obstante, los resultados entorno a la magnitud del error en el control del sistema son menores cuando los factores significativos del sistema como: la amplitud de las demandas (perturbaciones del sistema), los tipo de demanda pronosticada y el valor lead time, están en sus niveles bajos y son mayores cuando los niveles son altos.

Con base en los resultados obtenidos en esta investigación, se concluye que la implementación en el mercado de las estrategias DMC y PID es dependiente de la naturaleza del proceso. Es decir, si el proceso es tolerante a respuestas oscilatorias en los niveles, se recomienda seleccionar una estrategia MPC sobre una PID, por el contrario, si el producto final requiere de una alta precisión en los inventarios, se recomienda una estrategia PID. Adicional a los requerimientos del sistema, se debe contemplar variantes como los costos de implementación, complejidad del proceso, entre otros.

Esta investigación permitió establecer técnicas de control eficientes para la reducción de costos de almacenamiento, en sistemas multi-producto, con abastecimiento variable, demanda estocástica y comportamiento del lead time variable. En futuras investigaciones se recomienda ahondar en metodologías de sintonización para estrategias avanzadas de control y de estrategias clásicas para procesos integrantes, adicionalmente se debe estudiar el impacto de la sintonía en el desempeño del controlador, la integración de estrategias de control a metodologías de predicción, módulos de scheduling, redes neuronales, MRP u otras estrategias, de igual forma en la implementación de distintas estrategias predictivas en este enfoque.



## REFERENCIAS

- [1] H. e. a. SARIMVEIS, «Dynamic modeling and control of supply chain systems: A review.,» *Computers & Operations Research.*, vol. 35, nº 11, pp. 3530-3561, 2008.
- [2] T. W. GRUEN, D. S. CORSTEN y S. BHARADWAJ, «Retail out-of-stocks: A worldwide examination of extent, causes and consumer responses. Washington, DC: Grocery Manufacturers of America.,» 2002.
- [3] P. C. VERHOEF y L. M. SLOOT, «Out-of-stock: reactions, antecedents, management solutions, and a future perspective.,» *Retailing in the 21st Century. Springer Berlin Heidelberg.*, pp. 239-253, 2006.
- [4] M. & V. I. F. Bijvank, «Lost-sales inventory systems with a service level criterion.,» *European Journal of Operational Research.*, vol. 220(3), pp. 610-618, 2012.
- [5] R. Dinero., Revista Dinero., 25 Julio 2013. [En línea]. Available: <http://www.dinero.com/actualidad/noticias/articulo/caterpillar-gana-us1840-millones-primer-semester/180389>. [Último acceso: 01 Agosto 2015].
- [6] R. Dinero., Revista Dinero. , 12 Diciembre 2014. [En línea]. Available: <http://www.dinero.com/empresas/articulo/resultados-encuesta-opinion-industrial-conjunta-octubre-2014/204004..> [Último acceso: 01 Agosto 2015].
- [7] H. A. TAHA, Investigación de operaciones., Pearson Educación., 2004.
- [8] M. BIJVANK y I. F. VIS, «Lost-sales inventory systems with a service level criterion.,» *European Journal of Operational Research.*, vol. 220, nº 3, pp. 610-618, 2012.
- [9] M. O. a. & L. Lin, «Control theory applications to the production–inventory problem: a review,» *International Journal of Production Research*, vol. 42, nº 11, pp. 2303 - 2322, 2004.
- [10] W. W. COOPER, «A proposal for extending the theory of the firm.,» *Quarterly Journal of Economics.*, vol. 65, pp. 87-109, 1951.

- [11] H. A. SIMON, «On the application of servomechanism theory in the study of production control.,» *Econometrica.*, nº 20, p. 247–268, 1952.
- [12] J. H. VASSIAN, «Application of discrete variable servo theory to inventory control.,» *Operations Research.*, vol. 3, p. 272–282, 1955.
- [13] M. C. a. P. K. BONNEY, «Design of production control systems: choice of system structure and systems implementation sequence.,» *Engineering Costs and Production Economics.*, vol. 15, pp. 169-173, 1989.
- [14] S. J. QIN y T. A. BADGWELL, «A survey of industrial model predictive control technology.,» *Control engineering practice.*, vol. 11, nº 7, pp. 733-764, 2003.
- [15] R. H. Ballou, *Logística Administración de la cadena de suministro*, México: PEARSON EDUCACIÓN, 2004.
- [16] R. B. CHASE, N. J. AQUILANO y F. R. JACOBS, *Administración de producción y operaciones: manufactura y servicios.*, McGraw-Hill Interamericana., 2001.
- [17] H. 1. Scarf, «The Optimality of (s, S) Policies in the Dynamic Inventory Problem.,» *Mathematical Methods in the Social Sciences. Stanford University Press, Stanford, Ca..*
- [18] R. B. M. & B. D. Bordley, «Consolidating distribution centers can reduce lost sales.,» *International journal of production economics.*, vol. 58(1), pp. 57-61, 1999 .
- [19] T. Morton, «Bounds on the solution of the lagged optimal inventory equation with no demand backlogging and proportional costs.,» *SIAM Review*, vol. 11, p. 572–596, 1969.
- [20] K. d. K. T. R. W. van Donselaar, «Two replenishment strategies for the lost sales inventory model: a comparison.,» *International Journal of Production Economics.*, pp. 46–47, 285–295, 1996.
- [21] G. R. R. Janakiraman, «Lost sales problems with stochastic lead times: convexity results for base stock policies.,» *Operations Research.*, vol. 52, p. 795–803, 2004.

- [22] S. Johansen, «Pure and modified base stock policies for the lost sales inventory system with negligible set-up cost and constant lead time.,» *International Journal of Production Economics.*, vol. 71, p. 391–399, 2001.
- [23] C. Chiang, «Optimal ordering policies for periodic-review systems with replenishment cycles.,» *European Journal of Operational Research* 170., vol. 170, p. 44–56, 2006.
- [24] T. Xiao-yan, «(2008, December). Study on Inventory Control in Water Resource Supply Chain Management. In Business and Information Management, 2008. ISBIM'08.,» *International Seminar IEEE.*, vol. 2, pp. 337-340, 2008.
- [25] Z. & Y. M. Guirong, «Study on Auto enterprise inventory management. In Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering (ICIII).,» *International Conference. IEEE.*, vol. 2, pp. 181-184, 2011.
- [26] C. A. SMITH, Control automático de procesos: teoría y práctica., 1997.
- [27] J. L. a. B. W. L. CHRISTENSEN, «Modeling and optimal control of production processes.,» *International Journal of Systems Science*, vol. 1, p. 247–255, 1971.
- [28] S. IOANNIDIS, «An inventory and order admission control policy for production systems with two customer classes.,» *International Journal of Production Economics.*, vol. 131, nº 2, pp. 663-673, 2011.
- [29] J. F. a. S. B. D. BURNS, «Dynamic analysis of multi-echelon supply systems.,» *Computers and Industrial Engineering.*, vol. 2, p. 181–193, 1978.
- [30] K. SOURIRAJAN, B. RAMACHANDRAN y L. AN, «Application of control theoretic principles to manage inventory replenishment in a supply chain.,» *International Journal of Production Research.*, vol. 46, nº 21, pp. 6163-6188, 2008.
- [31] J. D. SCHWARTZ y D. E. RIVERA, «A control-relevant approach to demand modeling for supply chain management.,» *Computers & Chemical Engineering.*, vol. 70, pp. 78-90, 2014.

- [32] R. G. COYLE, «Assessing the controllability of a production and raw materials system.,» *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics.*, vol. 12, p. 867–876, 1982.
- [33] H. COSSETTE, M. DENUIT y E. MARCEAU, «DEPARTEMENT TOEGEPASTE ECONOMISCHE WETENSCHAPPEN.,» 2000.
- [34] D. e. a. FU, «Quantifying and mitigating the bullwhip effect in a benchmark supply chain system by an extended prediction self-adaptive control ordering policy.,» *Computers & Industrial Engineering.*, vol. 81, pp. 46-57, 2015.
- [35] D. P. a. E. S. Deziel, «A linear production  $\pm$  inventory control rule.,» *The Production Engineer*, vol. 43, p. 93±104, 1967.
- [36] D. R. E. G. N. a. C. P. TOWILL, «Analysis and design of an adaptive minimum reasonable inventory control system.,» *Production Planning and Control.*, vol. 8, p. 545–557, 1997.
- [37] M. W. e. a. BRAUN, «A model predictive control framework for robust management of multi-product, multi-echelon demand networks.,» *Annual Reviews in Control.*, vol. 27, nº 2, pp. 229-245, 2003.
- [38] E. AGGELOGIANNAKI y H. SARIMVEIS, «Design of a novel adaptive inventory control system based on the online identification of lead time.,» *International Journal of Production Economics.*, vol. 114, nº 2, pp. 781-792, 2008.
- [39] J. D. e. a. SCHWARTZ, «Control-relevant demand forecasting for tactical decision-making in semiconductor manufacturing supply chain management.,» *Semiconductor Manufacturing, IEEE Transactions.*, vol. 22, nº 1, pp. 154-163, 2009.
- [40] C. T. Chen, Analog and digital control system design: transfer-function, state-space, and algebraic methods., Oxford University Press, Inc., 1995.
- [41] M. S. MEJÍA, «Control Dinámico Matricial Fundamentación y estrategias de implementación.,» *Ingeniería y Desarrollo.*, nº 3-4, 1998.

- [42] G. Y.P., «Control of integrating processes using dynamic matrix control.,» *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 76, nº 4, pp. 465-470, 1998.
- [43] D. & B. R. Sipper, *Planeación y control de la producción*. Editorial Mc Graw Hill, 1999.
- [44] R. & V.-R. J. A. Ruiz, «The hybrid flow shop scheduling problem.,» *European Journal of Operational Research*, vol. 205, nº 1, pp. 1-18, 2010.
- [45] B. K. S. M. H. B. Akrami \*, «Two metaheuristic methods for the common cycle economic lot sizing and scheduling in flexible flow shops with limited intermediate buffers: The finite horizon case.,» *Applied Mathematics and Computation*, pp. 634-645, 2006.
- [46] E. B. A. D. Z. JOSEPH ADAMS, « THE SHIFTING BOTTLENECK PROCEDURE FOR JOB SHOP SCHEDULING.,» *Management science*, vol. 34, nº 3, pp. 391-401, 1988.
- [47] S. & V. J. A. Radhakrishnan, «Simulated annealing for parallel machine scheduling with earliness-tardiness penalties and sequence-dependent set-up times.,» *International Journal of Production Research*, vol. 38, nº 10, pp. 2233-2252, 2000.
- [48] Y. P. Gupta, «Control of integrating processes using dynamic matrix control.,» *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 4, nº 76, pp. 465-470, 1998.
- [49] S. CHOPRA y P. MEINDL, *Administración de la cadena de suministro. Estrategia, planeación y operación.*, 2008.
- [50] R. ISERMANN, «Process fault detection based on modeling and estimation methods—a survey.,» *Automática*, vol. 20, nº 4, pp. 387-404, 1984.
- [51] C. R. CUTLER y B. L. RAMAKER, «Dynamic Matrix control?? A computer control algorithm.,» *En joint automatic control conference.*, p. 72, 1980.
- [52] G. Z. W. van Houtum, «On the relation between cost and service models for general inventory systems.,» *Statistica Neerlandica.*, vol. 54, p. 127–147, 2000.

- [53] S. Johansen, «Base-stock policies for the lost sales inventory system with Poisson demand and Erlangian lead times.,» *International Journal of Production Economics.*, pp. 93–94, 429–437, 2005.
- [54] B. Sezen, «Changes in performance under various lengths of review periods in a periodic review inventory control system with lost sales – a simulation study.,» *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management.*, vol. 36, p. 360–373, 2006.
- [55] G. S. S. S. J. Janakiraman, «A comparison of the optimal costs of two canonical inventory systems.,» *Operations Research.*, vol. 55, p. 866–875, 2007.
- [56] A. F. M. Kök, «Demand estimation and assortment optimization under substitution: methodology and application.,» *Operations Research.*, vol. 55, p. 1002–1021, 2007.
- [57] W. J. G. M. J. R. P. Huh, «Asymptotic optimality of order-up-to policies in lost sales inventory systems.,» *Management Science.*, vol. 55, p. 404–420, 2009.
- [58] M. a. J. S. Bijvank, «Periodic review lost-sales inventory models with compound poisson demand and non-fractional lead times.,» *European Journal of Operational Research.*, 2012.
- [59] M. B. S. & H. W. T. Bijvank, «Parametric replenishment policies for inventory systems with lost sales and fixed order cost.,» *European Journal of Operational Research.*, vol. 241(2), pp. 381-390, 2015.
- [60] X. F. Y. K. M. F. & X. J. Chen, «Optimal inventory policy for two substitutable products with customer service objectives.,» *European Journal of Operational Research.*, 2015.
- [61] H. L. X. & C. Y. F. (. Zhu, «Effective inventory control policies with a minimum order quantity and batch ordering.,» *International Journal of Production Economics*, vol. 168, pp. 21-30, 2015.

- [62] F. D. G. G. S. A. & T. M. Costantino, «A real-time SPC inventory replenishment system to improve supply chain performances.,» *Expert Systems with Applications.*, vol. 42(3), pp. 1665-1683, 2015.
- [63] R. M. ADELSON, «The dynamic behavior of linear forecasting and scheduling rules.,» pp. 447-462, 1966.
- [64] R. G. VICKSON, «Optimal control of production sequences: a continuous parameter analysis.,» *Operations Research.*, vol. 30, p. 659–679, 1982.
- [65] S. AXSATER, «Control theory concepts in production and inventory control.,» *International Journal of Systems Science.*, vol. 16, n° 2, pp. 161-169, 1985.
- [66] K. a. B. M. C. POPPLEWELL, «The application of discrete linear control theory to the analysis and simulation of multi-product, multi-level production control systems.,» *International Journal of Production Research.*, n° 25, pp. 45-56, 1987.
- [67] W. J. a. J. A. T. DAVIS, «A functional approach to designing architectures for CIM.,» *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics.*, n° 19, pp. 164-174, 1989.
- [68] J. T. D. R. a. N. M. M. WIKNER, «Smoothing supply chain dynamics.,» *International Journal of Production Economics.*, n° 22, pp. 231-248, 1991.
- [69] D. R. N. M. M. a. W. J. TOWILL, «Industrial dynamics simulation models in the design of supply chains.,» *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management.*, n° 22, pp. 3-13, 1992.
- [70] J. N. M. M. a. T. D. R. WIKNER, «The system simplification approach in understanding the dynamic behaviour of a manufacturing supply chain.,» *Journal of Systems Engineering.*, vol. 2, p. 164–178, 1992.
- [71] H. P. a. B. J. W. WIENDAHL, «Automatic production control applying control theory.,» *International Journal of Production Economics.*, vol. 63, pp. 33-46, 2000.

- [72] E. e. a. PEREA, «Dynamic modeling and classical control theory for supply chain management.,» *Computers & Chemical Engineering.*, vol. 24, nº 2, pp. 1143-1149, 2000.
- [73] Z. M. AVSAR y M. BAYKAL-GÜRSOY, «Inventory control under substitutable demand: A stochastic game application.,» *Naval Research Logistics (NRL).*, vol. 49, nº 4, pp. 359-375, 2002.
- [74] E. PEREA-LOPEZ, B. E. YDSTIE y I. E. GROSSMANN, «A model predictive control strategy for supply chain optimization.,» *Computers & Chemical Engineering.*, vol. 27, nº 8, pp. 1201-1218, 2003.
- [75] W. WANG, D. E. RIVERA y K. G. KEMPF, «Centralized model predictive control strategies for inventory management in semiconductor manufacturing supply chains.,» *American Control Conference, 2003. Proceedings of the 2003. IEEE.*, pp. 585-590, 2003.
- [76] W. e. a. WANG, «A model predictive control strategy for supply chain management in semiconductor manufacturing under uncertainty.,» *American Control Conference. Proceedings of the 2004. IEEE.*, pp. 4577-4582, 2004.
- [77] P. PENNESI, G. CONTE y I. C. PASCHALIDIS, «Combining MPC and LD Analysis in Supply Chain Inventory Control Problem.,» *Control and Automation, 2006. MED'06. 14th Mediterranean Conference on. IEEE.*, pp. 1-6, 2006.
- [78] B. AGARAN, W. W. BUCHANAN y M. K. YURTSEVEN, «Regulating bullwhip effect in supply chains through modern control theory.,» *Management of Engineering and Technology, Portland International Center for. IEEE.*, pp. 2391-2398, 2007.
- [79] W. WANG y D. E. RIVERA, «Model predictive control for tactical decision-making in semiconductor manufacturing supply chain management.,» *Control Systems Technology, IEEE.*, vol. 16, nº 5, pp. 841-855, 2008.
- [80] X. LI y T. E. MARLIN, «Robust supply chain performance via Model Predictive Control.,» *Computers & Chemical Engineering.*, vol. 33, nº 12, pp. 2134-2143, 2009.



- [81] K. e. a. SUBRAMANIAN, «Integration of control theory and scheduling methods for supply chain management.,» *Computers & Chemical Engineering.*, vol. 51, pp. 4-20, 2013.
- [82] K. HOBERG y U. W. THONEMANN, «Modeling and analyzing information delays in supply chains using transfer functions.,» *International Journal of Production Economics.*, vol. 156, pp. 132-145, 2014.
- [83] D. e. a. FU, «Decentralized and centralized model predictive control to reduce the bullwhip effect in supply chain management.,» *Computers & Industrial Engineering.*, vol. 73, pp. 21-31, 2014.
- [84] K. J. (. Åström, «Theory and applications of self-tuning regulators.,» *Control Theory, Numerical Methods and Computer Systems Modelling. Springer Berlin Heidelberg.*, pp. 669-680, 1975.
- [85] K. J. Åström, «Theory and applications of adaptive control—a survey.,» *Automatic*, vol. 19(5), pp. 471-486, 1983.
- [86] H. & I. T. Takatsu, «Future needs for control theory in industry-report of the control technology survey in Japanese industry.,» *Control Systems Technology, IEEE Transactions.*, vol. 7(3), pp. 298-305, 1999.
- [87] J. L. M. V. & E. E. Hellerstein, «Applying control theory in the real world: experience with building a controller for the. Net thread pool.,» *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review.*, vol. 37(3), pp. 38-42, 2010.
- [88] S. A. BESSLER y P. W. ZEHNA, «Servomechanisms, Exponential Smoothing, and a Multiechelon Inventory Problem.,» *DECISION STUDIES GROUP PALO ALTO CALIF*, 1966.
- [89] S. AXSA" TER, «Balance of integrated production–inventory systems.,» *Proceedings of the Second European Congress on Operation Research (Amsterdam: North-Holland).*, pp. 9-19, 1976.
- [90] R. W. a. L. J. GRUBBSTRO" M, «the Axsas" ter integrated production–inventory system interpreted in terms of the theory of relatively closed systems.,» *Journal of Cybernetics.*, vol. 7, p. 49–67, 1977.

- [91] J. a. T. D. R. EDGHILL, «Assessing manufacturing system performance: frequency response revisited.,» *Engineering Costs and Production Economics*, vol. 19, pp. 319-326, 1990.
- [92] P. J. a. W. J. AGRELL, «An MCDM framework for dynamic systems.,» *International Journal of Production Economics*, vol. 45, p. 279–292, 1996.
- [93] R. W. a. W. J. GRUBBSTRO" M, «Inventory trigger control policies developed in terms of control theory.,» *International Journal of Production Economics*, vol. 45, p. 397–406, 1996.
- [94] G. N. N. M. M. a. T. D. R. EVANS, «Application of a simulation methodology to the redesign of a logistical control system.,» *International Journal of Production Economics.*, pp. 56–57, 157–168, 1998.
- [95] R. W. GRUBBSTRO" M, «A net present value approach to safety stocks in planned production.,» *International Journal of Production Economics.*, pp. 56–57, 213–229, 1998.
- [96] R. W. a. T. O. GRUBBSTRO" M, «Modelling rescheduling activities in a multi-period production–inventory system.,» *Proceedings of the 10th International Working Seminar on Production Economics, Innsbruck.*, p. 67–84, 1998.
- [97] R. W. a. T. O. GRUBBSTRO" M, «Further developments on safety stocks in an MRP system applying Laplace transforms and input–output methodology.,» *International Journal of Production Economics.*, pp. 60–61, 381–387, 1999.
- [98] A. S. WHITE, «Management of inventory using control theory.,» *International Journal of Technology Management.*, vol. 17, p. 847–860, 1999.
- [99] S. M. N. M. M. a. T. D. R. DISNEY, «Genetic algorithm optimization of a class of inventory control systems.,» *International Journal of Production Economics*, vol. 68, p. 259–278, 2000.
- [100] R. W. a. T. O. GRUBBSTRO" M, «An overview of input–output analysis applied to production–inventory systems.,» *Economic Systems Research.*, vol. 12, p. 3–25, 2000.

- [101] S. M. a. T. D. R. DISNEY, «A discrete transfer function model to determine the dynamic stability of a vendor managed inventory supply chain.,» *International Journal of Production Research*, vol. 40, p. 179–204, 2002.
- [102] R. W. a. W. Z. GRUBBSTRO" M, «A stochastic model of multi-level/multi-stage capacity-constrained production–inventory systems.,» *International Journal of Production Economics.*, pp. 81–82, 483–494, 2003.
- [103] M. W. e. a. BRAUN, «Application of model predictive control to robust management of multiechelon demand networks in semiconductor manufacturing.,» *Simulation.*, vol. 79, nº 3, pp. 139-156, 2003.
- [104] W. e. a. WANG, «A model predictive control approach for managing semiconductor manufacturing supply chains under uncertainty.,» *Annual AIChE Meeting*, pp. 1-34, 2003.
- [105] K. B. J. R. & T. U. W. Hoberg, «Analyzing the effect of the inventory policy on order and inventory variability with linear control theory.,» *European Journal of Operational Research*, vol. 176, p. 1620–1642, 2007.
- [106] J. e. a. SHIN, «Analytical design of a proportional-integral controller for constrained optimal regulatory control of inventory loop.,» *Control engineering practice.*, vol. 16, nº 11, pp. 1391-1397, 2008.
- [107] E. AGGELOGIANNAKI, P. DOGANIS y H. SARIMVEIS, «An adaptive model predictive control configuration for production–inventory systems.,» *International Journal of Production Economics.*, vol. 114, nº 1, pp. 165-178, 2008.
- [108] J. D. & R. D. E. Schwartz, «A process control approach to tactical inventory management in production-inventory systems.,» *International Journal of Production Economics.*, vol. 125(1), p. 111–124, 2010.
- [109] A. S. WHITE y M. CENSLIVE, «Using control theory to optimise profit in APVIOBPCS inventory systems.,» *Journal of Manufacturing Systems.*, vol. 32, nº 4, pp. 680-688, 2013.

- [110] M. RAVANSHADNIA y M. GHANBARI, «A hybrid EOQ and fuzzy model to minimize the material inventory in ready mixed concrete plants.,» *Industrial Engineering and Engineering Management IEEE International Conference.*, pp. 526-530, 2014.
- [111] K. SUBRAMANIAN, J. B. RAWLINGS y C. T. MARAVELIAS, «Economic model predictive control for inventory management in supply chains.,» *Computers & Chemical Engineering.*, vol. 64, pp. 71-80, 2014.
- [112] D. O. N. G. HAI, Z. HAO y L. Y. PING, «Model predictive control for inventory management in supply chain planning.,» *Procedia Engineering.*, vol. 15, pp. 1154-1159, 2011.
- [113] A. FOUL, L. TADJ y R. HEDJAR, «Adaptive control of inventory systems with unknown deterioration rate.,» *Journal of King Saud University-Science.*, vol. 24, nº 3, pp. 215-220, 2012.
- [114] M. S. Mejía, «Control Dinámico Matricial Fundamentación y estrategias de implementación.,» *Ingeniería y Desarrollo*, 1998.
- [115] R. G. & S. C. R. Askin, Modeling and analysis of manufacturing systems., John Wiley & Sons Inc., 1993.
- [116] R. L. Sipper Daniel, Production: planning, control, and integration, McGraw-Hill Science Engineering & Mathematics , 1997.

## Anexos

ANEXO 1. TAXONOMÍA GESTIÓN DE INVENTARIOS.

NÚM	AÑO	REFERENCIA	CARACTERÍSTICAS									
			Multi-producto	Monoproducto	Pronóstico	Lead Time	Costos	Demanda	Nivel de Servicio	Nivel de Inventario Deseado	MRP	Stock de Seguridad
1	1960	Scarf, H., 1960. The Optimality of (s, S) Policies in the Dynamic Inventory Problem. In: Arrow, K.J., Karlin, S., Suppes, P. (Eds.), Mathematical Methods in the Social Sciences. Stanford University Press, Stanford, Ca.		x		No se considera	x	Estocástico				
2	1969	Morton, T.E., 1969. Bounds on the solution of the lagged optimal inventory equation with no demand backlogging and proportional costs. SIAM Review 11, 572-596.		x		Variable	x	Estocástico				x
3	1996	van Donselaar, K., de Kok, T., Rutten, W., 1996. Two replenishment strategies for the lost sales inventory model: a comparison. International Journal of Production Economics 46-47, 285-295.		x		Variable		Estocástico	x	x		x
4	1999	Bordley, R., Beltramo, M., & Blumenfeld, D. (1999). Consolidating distribution centers can reduce lost sales. International journal of production economics, 58(1), 57-61.	x			Variable	x	Determinístico	x			
5	2000	van Houtum, G.J., Zijm, W.H.M., 2000. On the relation between cost and service models for general inventory systems. Statistica Neerlandica 54, 127-147.		x		Variable	x	Determinístico				x
6	2001	Johansen, S.G., 2001. Pure and modified base stock policies for the lost sales inventory system with negligible set-up cost and constant lead time. International Journal of Production Economics 71, 391-399.		x		Constante	x	Estocástico	x			x
7	2004	Janakiraman, G., Roundy, R.O., 2004. Lost sales problems with stochastic lead times: convexity results for base stock policies. Operations Research 52, 795-803.		x		Variable	x	Estocástico				x
8	2005	Johansen, S.G., 2005. Base-stock policies for the lost sales inventory system with Poisson demand and Erlangian lead times. International Journal of Production Economics 93-94, 429-437.		x		Variable	x	Estocástico				x

NÚM	AÑO	REFERENCIA	CARACTERÍSTICAS									
			Multi-producto	Monoproducto	Pronóstico	Lead Time	Costos	Demanda	Nivel de Servicio	Nivel de Inventario Deseado	MRP	Stock de Seguridad
9	2006	Chiang, C., 2006. Optimal ordering policies for periodic-review systems with replenishment cycles. <i>European Journal of Operational Research</i> 170, 44–56.		x		Constante	x	Estocástico	x			x
10	2006	Sezen, B., 2006. Changes in performance under various lengths of review periods in a periodic review inventory control system with lost sales – a simulation study. <i>International Journal of Physical Distribution and Logistics Management</i> 36, 360–373.	x		x	Variable	x	Estocástico	x	x		x
11	2007	Janakiraman, G., Seshadri, S., Shanthikumar, J.G., 2007. A comparison of the optimal costs of two canonical inventory systems. <i>Operations Research</i> 55, 866–875.		x		Variable	x	Estocástico		x		
12	2007	Kök, A.G., Fisher, M.L., 2007. Demand estimation and assortment optimization under substitution: methodology and application. <i>Operations Research</i> 55, 1002–1021.	x			Constante	x	Determinístico	x			x
13	2008	Xiao-yan, T. (2008, December). Study on Inventory Control in Water Resource Supply Chain Management. In <i>Business and Information Management, 2008. ISBIM'08. International Seminar on</i> (Vol. 2, pp. 337–340). IEEE.		x	x	No se considera	x	Estocástico				
14	2009	Huh, W.T., Janakiraman, G., Muckstadt, J.A., Rusmevichientong, P., 2009. Asymptotic optimality of order-up-to policies in lost sales inventory systems. <i>Management Science</i> 55, 404–420.		x		Variable	x	Estocástico	x	x		x
15	2011	Guirong, Z., & Yuxin, M. (2011, November). Study on Auto enterprise inventory management. In <i>Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering (ICIII), 2011 International Conference on</i> (Vol. 2, pp. 181–184). IEEE.	x			No se considera	x	Determinístico				x
16	2012	Bijvank, M., & Vis, I. F. (2012). Lost-sales inventory systems with a service level criterion. <i>European Journal of Operational Research</i> , 220(3), 610–618.		x		Variable	x	Estocástico	x			x

NÚM	AÑO	REFERENCIA	CARACTERÍSTICAS									
			Multi-producto	Monoproducto	Pronóstico	Lead Time	Costos	Demanda	Nivel de Servicio	Nivel de Inventario Deseado	MRP	Stock de Seguridad
17	2012	Bijvank, M., and Johansen, S.G., 2012. Periodic review lost-sales inventory models with compound poisson demand and non-fractional lead times. <i>European Journal of Operational Research</i> . oi:10.1016/j.ejor.2012.01.041.		x		Variable	x	Estocástico	x			x
18	2015	Bijvank, M., Bhulai, S., & Huh, W. T. (2015). Parametric replenishment policies for inventory systems with lost sales and fixed order cost. <i>European Journal of Operational Research</i> , 241(2), 381-390.		x		Constante	x	Estocástico	x			x
19	2015	Chen, X., Feng, Y., Kebliş, M. F., & Xu, J. (2015). Optimal inventory policy for two substitutable products with customer service objectives. <i>European Journal of Operational Research</i> .	x		x	No se considera	x	Estocástico		x		
20	2015	Zhu, H., Liu, X., & Chen, Y. F. (2015). Effective inventory control policies with a minimum order quantity and batch ordering. <i>International Journal of Production Economics</i> , 168, 21-30.		x		Variable	x	Estocástico	x			x
21	2015	Costantino, F., Di Gravio, G., Shaban, A., & Tronci, M. (2015). A real-time SPC inventory replenishment system to improve supply chain performances. <i>Expert Systems with Applications</i> , 42(3), 1665-1683.		x		Constante		Estocástico	x			x



**ANEXO 2. TAXONOMÍA DE APLICACIONES DE LA TEORÍA DE CONTROL DE PROCESOS EN EL SECTOR INDUSTRIAL.**

NÚM	AÑO	REFERENCIA	ENTORNOS DE OPERACIÓN		MODELO DE CONTROL	
			Contexto de Aplicación	Tipo de Problema	Método del Modelo	Técnica de Control
1	1951	COOPER, W. W., A proposal for extending the theory of the firm. <i>Quarterly Journal of Economics</i> , 1951, 65, 87-109.	Control de Inventario	Economía	No se especifica	No se especifica
2	1966	ADELSON, R. M. The dynamic behaviour of linear forecasting and scheduling rules. <i>OR</i> , 1966, p. 447-462.	Control de Inventario	Control de Producción	Muestreado	Función de Transformada Z
3	1971	CHRISTENSEN, J. L. and BROGAN, W. L., Modeling and optimal control of production processes, 1971. <i>International Journal of Systems Science</i> , 1, 247-255.	Control de Inventario	Control de Calidad	Muestreado	Dinámica de Sistemas
4	1978	BURNS, J. F. and SIVAZLIAN, B. D., Dynamic analysis of multi-echelon supply systems, 1978. <i>Computers and Industrial Engineering</i> , 2, 181-193.	Control de Inventario	Cadena de Suministro	Análogo	Función de Transformada de Laplace
5	1982	COYLE, R. G., Assessing the controllability of a production and raw materials system, 1982. <i>IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics</i> , 12, 867-876.	Control de Inventario	Control de Producción	Análogo	Dinámica de Sistemas
6	1982	VICKSON, R. G., Optimal control of production sequences: a continuous parameter analysis, 1982. <i>Operations Research</i> , 30, 659-679.	Control de Inventario	Control de Calidad	Análogo	Función de Transformada de Laplace
7	1985	AXSATER, Sven. Control theory concepts in production and inventory control. <i>International Journal of Systems Science</i> , 1985, vol. 16, no 2, p. 161-169	Control de Inventario	Cadena de Suministro	Muestreado	Funciones de Transferencia
8	1987	POPPELWELL, K. and BONNEY, M. C., The application of discrete linear control theory to the analysis and simulation of multi-product, multi-level production control systems, 1987. <i>International Journal of Production Research</i> , 25, 45-56.	Control de Inventario	Control de Producción	Muestreado	Función de Transformada Z
9	1989	DAVIS, W. J. and JONES, A. T., A functional approach to designing architectures for CIM, 1989. <i>IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics</i> , 19, 164-174.	Control de Inventario	Control de Calidad	Muestreado	Funciones de Transferencia

NÚM	AÑO	REFERENCIA	ENTORNOS DE OPERACIÓN		MODELO DE CONTROL	
			Contexto de Aplicación	Tipo de Problema	Método del Modelo	Técnica de Control
9	1989	DAVIS, W. J. and JONES, A. T., A functional approach to designing architectures for CIM, 1989. <i>IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics</i> , 19, 164–174.	Control de Inventario	Control de Calidad	Muestreado	Funciones de Transferencia
10	1991	WIKNER, J., TOWILL, D. R. and NAIM, M. M., Smoothing supply chain dynamics, 1991. <i>International Journal of Production Economics</i> , 22, 231–248.	Control de Inventario	Cadena de Suministro	Muestreado	Funciones de Transferencia
11	1992	TOWILL, D. R., NAIM, M. M. and WIKNER, J., Industrial dynamics simulation models in the design of supply chains, 1992. <i>International Journal of Physical Distribution and Logistics Management</i> , 22, 3–13.	Control de Inventario	Cadena de Suministro	Análogo - Muestreado	Dinámica de Sistemas
12	1992	WIKNER, J., NAIM, M. M. and TOWILL, D. R., The system simplification approach in understanding the dynamic behaviour of a manufacturing supply chain, 1992. <i>Journal of Systems Engineering</i> , 2, 164–178.	Control de Inventario	Cadena de Suministro	Análogo - Muestreado	Ecuaciones Diferenciales
13	2000	WIENDAHL, H. P. and BREITHAUPT, J. W., Automatic production control applying control theory, 2000. <i>International Journal of Production Economics</i> , 63, 33–46.	Control de Inventario	Control de Producción	Análogo	Funciones de Transferencia
14	2000	PEREA, Edgar, et al. Dynamic modeling and classical control theory for supply chain management, 2000. <i>Computers &amp; Chemical Engineering</i> , vol. 24, no 2, p. 1143-1149.	Control de Inventario	Cadena de Suministro	No se especifica	Funciones de Transferencia
15	2001	WETENSCHAPPEN, ECONOMISCHE. DEPARTEMENT TOEGEPASTE ECONOMISCHE WETENSCHAPPEN.	Control de Inventario	Efecto Latigo	Muestreado	Función de Transformada Z
16	2002	AVSAR, Zeynep Müge; BAYKAL-GÜRSOY, Melike. Inventory control under substitutable demand: A stochastic game application. <i>Naval Research Logistics (NRL)</i> , 2002, vol. 49, no 4, p. 359-375.	Control de Inventario	Control de Producción	Análogo	Función de Transformada de Laplace

NÚM	AÑO	REFERENCIA	ENTORNOS DE OPERACIÓN		MODELO DE CONTROL	
			Contexto de Aplicación	Tipo de Problema	Método del Modelo	Técnica de Control
17	2003	PEREA-LOPEZ, Edgar; YDSTIE, B. Erik; GROSSMANN, Ignacio E. A model predictive control strategy for supply chain optimization, 2003. Computers & Chemical Engineering, vol. 27, no 8, p. 1201-1218.	Control de Inventario	Cadena de Suministro	Muestreado	Modelo de Control Predictivo
18	2003	WANG, Wenlin; RIVERA, Daniel E.; KEMPF, Karl G. Centralized model predictive control strategies for inventory management in semiconductor manufacturing supply chains. En American Control Conference, 2003. Proceedings of the 2003. IEEE, 2003. p. 585-590.	Control de Inventario	Cadena de Suministro	No se especifica	Modelo de Control Predictivo
19	2004	WANG, Wenlin, et al. A model predictive control strategy for supply chain management in semiconductor manufacturing under uncertainty, 2004. En American Control Conference. Proceedings of the 2004. IEEE, 2004. p. 4577-4582.	Control de Inventario	Cadena de Suministro	No se especifica	Modelo de Control Predictivo
20	2006	PENNESI, Paris; CONTE, Giuseppe; PASCHALIDIS, I. Ch. Combining MPC and LD Analysis in Supply Chain Inventory Control Problem. En Control and Automation, 2006. MED'06. 14th Mediterranean Conference on. IEEE, 2006. p. 1-6.	Control de Inventario	Cadena de Suministro	No se especifica	Modelo de Control Predictivo
21	2007	AGARAN, Berrin; BUCHANAN, Walter W.; YURTSEVEN, M. K. Regulating bullwhip effect in supply chains through modern control theory. En Management of Engineering and Technology, Portland International Center for. IEEE, 2007. p. 2391-2398.	Control de Inventario	Efecto Latigo	Muestreado	Función de Transformada Z
22	2008	WANG, Wenlin; RIVERA, Daniel E. Model predictive control for tactical decision-making in semiconductor manufacturing supply chain management. Control Systems Technology, IEEE Transactions on, 2008, vol. 16, no 5, p. 841-855.	Control de Inventario	Cadena de Suministro	Muestreado	Modelo de Control Predictivo
23	2008	SOURIRAJAN, K.; RAMACHANDRAN, B.; AN, L. Application of control theoretic principles to manage inventory replenishment in a supply chain. International Journal of Production Research, 2008, vol. 46, no 21, p. 6163-6188.	Control de Inventario	Cadena de Suministro	Muestreado	Función de Transformada Z

NÚM	AÑO	REFERENCIA	ENTORNOS DE OPERACIÓN		MODELO DE CONTROL	
			Contexto de Aplicación	Tipo de Problema	Método del Modelo	Técnica de Control
24	2009	LI, Xiang; MARLIN, Thomas E. Robust supply chain performance via Model Predictive Control. <i>Computers &amp; Chemical Engineering</i> , 2009, vol. 33, no 12, p. 2134-2143.	Control de Inventario	Cadena de Suministro	Muestreado	Modelo de Control Predictivo
25	2013	SUBRAMANIAN, Kaushik, et al. Integration of control theory and scheduling methods for supply chain management, 2013. <i>Computers &amp; Chemical Engineering</i> , vol. 51, p. 4-20.	Control de Inventario	Cadena de Suministro	Muestreado	Modelo de Control Predictivo
26	2014	HOBERG, Kai; THONEMANN, Ulrich W. Modeling and analyzing information delays in supply chains using transfer functions, 2014. <i>International Journal of Production Economics</i> , vol. 156, p. 132-145.	Control de Inventario	Cadena de Suministro	Muestreado	Función de Transformada Z
27	2014	SCHWARTZ, Jay D.; RIVERA, Daniel E. A control-relevant approach to demand modeling for supply chain management. <i>Computers &amp; Chemical Engineering</i> , 2014, vol. 70, p. 78-90.	Control de Inventario	Cadena de Suministro	Muestreado	Función de Transformada Z
28	2014	FU, Dongfei, et al. Decentralized and centralized model predictive control to reduce the bullwhip effect in supply chain management. <i>Computers &amp; Industrial Engineering</i> , 2014, vol. 73, p. 21-31.	Control de Inventario	Efecto Latigo	Muestreado	Modelo de Control Predictivo
29	2015	FU, Dongfei, et al. Quantifying and mitigating the bullwhip effect in a benchmark supply chain system by an extended prediction self-adaptive control ordering policy. <i>Computers &amp; Industrial Engineering</i> , 2015, vol. 81, p. 46-57.	Control de Inventario	Efecto Latigo	Muestreado	Función de Transformada Z
30	1975	Åström, K. J. (1975). Theory and applications of self-tuning regulators. In <i>Control Theory, Numerical Methods and Computer Systems Modelling</i> (pp. 669-680). Springer Berlin Heidelberg.	Control de Procesos	Reguladores de Autoajuste	Análogo	Adaptativo

NÚM	AÑO	REFERENCIA	ENTORNOS DE OPERACIÓN		MODELO DE CONTROL	
			Contexto de Aplicación	Tipo de Problema	Método del Modelo	Técnica de Control
31	1983	Åström, K. J. (1983). <i>Theory and applications of adaptive control—a survey</i> . <i>Automatica</i> , 19(5), 471-486.	Control de Procesos	REVIEW	Análogo - Muestreado	Adaptativo
32	1999	Takatsu, H., & Itoh, T. (1999). <i>Future needs for control theory in industry-report of the control technology survey in Japanese industry</i> . <i>Control Systems Technology, IEEE Transactions on</i> , 7(3), 298-305.	Control de Procesos	Tecnología de Control	Análogo	Modelo de Control Predictivo
33	2010	Hellerstein, J. L., Morrison, V., & Eilebrecht, E. (2010). <i>Applying control theory in the real world: experience with building a controller for the. net thread pool</i> . <i>ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review</i> , 37(3), 38-42.	Control de Procesos	Tecnología de Control	Muestreado	Adaptativo
34	2011	IOANNIDIS, Stratos. <i>An inventory and order admission control policy for production systems with two customer classes</i> . <i>International Journal of Production Economics</i> , 2011, vol. 131, no 2, p. 663-673.	Control de Procesos	Control de Calidad	Muestreado	Funciones de Transferencia

**ANEXO 3. TAXONOMÍA APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE CONTROL A LA GESTIÓN DE INVENTARIOS.**

NÚM	AÑO	REFERENCIA	ENTORNOS DE OPERACIÓN		MODELO DE CONTROL			CARACTERÍSTICAS									
			Contexto de Aplicación	Tipo de Problema	Método del Modelo	Matemática del Modelo	Técnica de Control	Multi-producto	Monoproducto	Pronostico	Lead Time	Costos	Demanda	Nivel de Servicio	Nivel de Inventario Deseado	MRP	Stock de Seguridad
1	1952	SIMON, H. A., On the application of servomechanism theory in the study of production control, 1952. <i>Econometrica</i> , 20, 247–268.	Control de Inventario	Control de Inventario	Análogo	Función de Transformada de Laplace	Retroalimentación simple		x		No se considera	x	No se considera		x		x
2	1955	VASSIAN, J. H., Application of discrete variable servo theory to inventory control, 1955. <i>Operations Research</i> , 3, 272–282.	Control de Inventario	Control de Inventario	Muestreo	Ecuaciones de Diferencia	Feedforward		x	x	Constante	x	Determinística		x		x
3	1966	BESSLER, Stuart A.; ZEHNA, Peter W. Servomechanisms, Exponential Smoothing, and a Multiechelon Inventory Problem. <i>DECISION STUDIES GROUP PALO ALTO CALIF</i> , 1966.	Control de Inventario	Control de Inventario	Muestreo	Función de Transformada Z	Retroalimentación simple		x	x	Constante		Determinística				x
4	1967	Deziel, D. P. and Eilon, S., 1967, A linear production±inventory control rule. <i>The Production Engineer</i> , 43, 93±104.	Control de Inventario	Control de Inventario	Muestreo	Función de Transformada Z	Feedforward		x	x	Variable	x	Determinística	x			x
5	1976	AXSATER, S., Balance of integrated production–inventory systems, 1976. <i>Proceedings of the Second European Congress on Operation Research (Amsterdam: North-Holland)</i> , pp. 9–19.	Control de Inventario	Control de Inventario	No se especifica	Espacios de Estado	Retroalimentación simple		x		No se considera		Determinística				x

NÚM	AÑO	REFERENCIA	ENTORNOS DE OPERACIÓN		MODELO DE CONTROL			CARACTERÍSTICAS									
			Contexto de Aplicación	Tipo de Problema	Método del Modelo	Matemática del Modelo	Técnica de Control	Multi-producto	Monoproducto	Pronostico	Lead Time	Costos	Demanda	Nivel de Servicio	Nivel de Inventario Deseado	MRP	Stock de Seguridad
6	1977	GRUBBSTRO <sup>™</sup> M, R. W. and LUNDQUIST, J., The Axsa <sup>™</sup> ter integrated production-inventory system interpreted in terms of the theory of relatively closed systems, 1977. <i>Journal of Cybernetics</i> , 7, 49-67	Control de Inventario	Control de Inventario	Análogo	Función de Transformada de Laplace	Retroalimentación simple		x		No se considera	x	Determinística				x
7	1989	BONNEY, M. C. and POPPLEWELL, K., Design of production control systems: choice of system structure and systems implementation sequence, 1989. <i>Engineering Costs and Production Economics</i> , 15, 169-173.	Control de Inventario	Control de Inventario	Muestreo	Función de Transformada Z	Feedforward	x		x	Constante		Determinística			x	x
8	1990	EDGHILL, J. and TOWILL, D. R., Assessing manufacturing system performance: frequency response revisited, 1990. <i>Engineering Costs and Production Economics</i> , 19, 319-326.	Control de Inventario	Control de Inventario	Análogo	Función de Transformada de Laplace	Feedforward		x		No se considera	x	Estocástico		x		x
9	1996	AGRELL, P. J. and WIKNER, J., An MCDM framework for dynamic systems, 1996. <i>International Journal of Production Economics</i> , 45, 279-292.	Control de Inventario	Control de Inventario	Análogo	Función de Transformada de Laplace	Feedforward		x	x	Variable		Determinística		x		x
10	1996	GRUBBSTRO <sup>™</sup> M, R. W. and WIKNER, J., Inventory trigger control policies developed in terms of control theory, 1996. <i>International Journal of Production Economics</i> , 45, 397-406.	Control de Inventario	Control de Inventario	Análogo	Función de Transformada de Laplace	Cascada - PID	x		x	Variable	x	Determinística		x		x

NÚM	AÑO	REFERENCIA	ENTORNOS DE OPERACIÓN		MODELO DE CONTROL			CARACTERÍSTICAS									
			Contexto de Aplicación	Tipo de Problema	Método del Modelo	Matemática del Modelo	Técnica de Control	Multi-producto	Monoproducto	Pronostico	Lead Time	Costos	Demanda	Nivel de Servicio	Nivel de Inventario Deseado	MRP	Stock de Seguridad
11	1997	TOWILL, D. R., EVANS, G. N. and CHEEMA, P., Analysis and design of an adaptive minimum reasonable inventory control system, 1997. <i>Production Planning and Control</i> , 8, 545-557.	Control de Inventario	Control de Inventario	Análogo	Función de Transformada de Laplace	Adaptativo	X			Variable	X	Estocástico	x	x	x	X
12	1998	EVANS, G. N., NAIM, M. M. and TOWILL, D. R., Application of a simulation methodology to the redesign of a logistical control system, 1998. <i>International Journal of Production Economics</i> , 56-57, 157-168.	Control de Inventario	Control de Inventario	Análogo	Función de Transformada de Laplace	Adaptativo		x	X	Constante		Estocástico			x	X
13	1998	GRUBBSTROTT M, R. W., A net present value approach to safety stocks in planned production, 1998. <i>International Journal of Production Economics</i> , 56-57, 213-229.	Control de Inventario	Control de Inventario	Análogo	Función de Transformada de Laplace	Retroalimentación simple		x	X	Variable	X	Determinística			x	X
14	1998	GRUBBSTROTT M, R. W. and TANG, O., Modelling rescheduling activities in a multi-period production-inventory system, 1998. <i>Proceedings of the 10th International Working Seminar on Production Economics</i> , Innsbruck, pp. 67-84.	Control de Inventario	Control de Inventario	Análogo	Función de Transformada de Laplace	Retroalimentación simple		x	x	Variable	x	Determinística	x		x	x



NÚM	AÑO	REFERENCIA	ENTORNOS DE OPERACIÓN		MODELO DE CONTROL			CARACTERÍSTICAS									
			Contexto de Aplicación	Tipo de Problema	Método del Modelo	Matemática del Modelo	Técnica de Control	Multi-producto	Monoproducto	Pronostico	Lead Time	Costos	Demanda	Nivel de Servicio	Nivel de Inventario Deseado	MRP	Stock de Seguridad
15	1999	GRUBBSTRO " M, R. W. and TANG, O., Further developments on safety stocks in an MRP system applying Laplace transforms and input-output methodology, 1999. International Journal of Production Economics, 60-61, 381-387.	Control de Inventario	Control de Inventario	Análogo	Función de Transformada de Laplace	Adaptativo		X		Variable	X	Estocástico	x		x	X
16	1999	WHITE, A. S., Management of inventory using control theory, 1999. International Journal of Technology Management, 17, 847-860.	Control de Inventario	Control de Inventario	Análogo	Función de Transformada de Laplace	Feedforward		x	X	No se considera	X	Determinística		x	x	X
17	2000	DISNEY, S. M., NAIM, M. M. and TOWILL, D. R., Genetic algorithm optimization of a class of inventory control systems, 2000. International Journal of Production Economics, 68, 259-278.	Control de Inventario	Control de Inventario	Análogo	Función de Transformada de Laplace	Feedforward	x		x	Variable	X	Estocástico		x	x	X
18	2000	GRUBBSTRO " M, R. W. and TANG, O., An overview of input-output analysis applied to production-inventory systems, 2000. Economic Systems Research, 12, 3-25.	Control de Inventario	Control de Inventario	Análogo	Función de Transformada de Laplace	Retroalimentación simple		x		Variable	x	Estocástico			x	x

NÚM	AÑO	REFERENCIA	ENTORNOS DE OPERACIÓN		MODELO DE CONTROL			CARACTERÍSTICAS									
			Contexto de Aplicación	Tipo de Problema	Método del Modelo	Matemática del Modelo	Técnica de Control	Multi-producto	Monoproducto	Pronostico	Lead Time	Costos	Demanda	Nivel de Servicio	Nivel de Inventario Deseado	MRP	Stock de Seguridad
19	2002	DISNEY, S. M. and TOWILL, D. R., A discrete transfer function model to determine the dynamic stability of a vendor managed inventory supply chain, 2002. <i>International Journal of Production Research</i> , 40, 179–204.	Control de Inventario	Control de Inventario	Muestreo	Función de Transformada Z	Feedforward		x	x	Variable	x	Estocástico	x	x	x	x
20	2003	GRUBBSTRO " M, R. W. and WANG, Z., A stochastic model of multi-level/multi-stage capacity-constrained production–inventory systems, 2003. <i>International Journal of Production Economics</i> , 81–82, 483–494.	Control de Inventario	Control de Inventario	Muestreo	Función de Transformada de Laplace	Retroalimentación simple		x	x	Constante	x	Determinística	x		x	x
21	2003	BRAUN, Martin W., et al. A model predictive control framework for robust management of multi-product, multi-echelon demand networks. <i>Annual Reviews in Control</i> , 2003, vol. 27, no 2, p. 229-245.	Control de Inventario	Control de Inventario	Muestreo	Ecuaciones Algebraicas	Cascada - MPC	x		x	Variable	x	Determinística	x			x
22	2003	BRAUN, Martin W., et al. Application of model predictive control to robust management of multiechelon demand networks in semiconductor manufacturing. <i>Simulation</i> , 2003, vol. 79, no 3, p. 139-156.	Control de Inventario	Control de Inventario	Muestreo	Ecuaciones Algebraicas	Cascada - MPC		x		Variable		Determinística	x			x

NÚM	AÑO	REFERENCIA	ENTORNOS DE OPERACIÓN		MODELO DE CONTROL			CARACTERÍSTICAS									
			Contexto de Aplicación	Tipo de Problema	Método del Modelo	Matemática del Modelo	Técnica de Control	Multi-producto	Monoproducto	Pronostico	Lead Time	Costos	Demanda	Nivel de Servicio	Nivel de Inventario Deseado	MRP	Stock de Seguridad
23	2003	WANG, Wenlin, et al. A model predictive control approach for managing semiconductor manufacturing supply chains under uncertainty. En Annual AIChE Meeting, paper 446d: pgs. 2003. p. 1-34.	Control de Inventario	Control de Inventario	Muestro	Ecuaciones Algebraicas	MPC	x		X	Variable	X	Determinística	x	x		X
24	2007	Hoberg, K., Bradley, J. R., & Thonemann, U. W. (2007). Analyzing the effect of the inventory policy on order and inventory variability with linear control theory. European Journal of Operational Research, 176, 1620–1642.	Control de Inventario	Control de Inventario	Muestro	Función de Transformada Z	Feedforward		x	X	Variable		Determinística	X			x
25	2008	SHIN, Joonho, et al. Analytical design of a proportional-integral controller for constrained optimal regulatory control of inventory loop. Control engineering practice, 2008, vol. 16, no 11, p. 1391-1397.	Control de Inventario	Control de Inventario	Análogo	Función de Transformada de Laplace	Retroalimentación simple		X		No se considera	x	No se considera		X		
26	2008	AGGELOGIANNAKI, Eleni; SARIMVEIS, Haralambos. Design of a novel adaptive inventory control system based on the online identification of lead time. International Journal of Production Economics, 2008, vol. 114, no 2, p. 781-792.	Control de Inventario	Control de Inventario	Muestro	Función de Transformada Z	Feedforward		x	x	Variable		Determinística		x		x

NÚM	AÑO	REFERENCIA	ENTORNOS DE OPERACIÓN		MODELO DE CONTROL			CARACTERÍSTICAS									
			Contexto de Aplicación	Tipo de Problema	Método del Modelo	Matemática del Modelo	Técnica de Control	Multi-producto	Monoproducto	Pronostico	Lead Time	Costos	Demanda	Nivel de Servicio	Nivel de Inventario Deseado	MRP	Stock de Seguridad
27	2008	AGGELOGIANNAKI, Eleni; DOGANIS, Philip; SARIMVEIS, Haralambos. An adaptive model predictive control configuration for production-inventory systems. <i>International Journal of Production Economics</i> , 2008, vol. 114, no 1, p. 165-178.	Control de Inventario	Control de Inventario	Muestreo	Espacios de Estado	Adaptativo - MPC		x		Constante		Determinística				
28	2009	SCHWARTZ, Jay D., et al. Control-relevant demand forecasting for tactical decision-making in semiconductor manufacturing supply chain management, 2009.Semiconductor Manufacturing, <i>IEEE Transactions on</i> , vol. 22, no 1, p. 154-163.	Control de Inventario	Control de Inventario	Muestreo	Función de Transformada Z	Feedforward - MPC		x	x	No se considera	x	Determinística		x		x
29	2010	Schwartz, J. D., & Rivera, D. E. (2010). A process control approach to tactical inventory management in production-inventory systems. <i>International Journal of Production Economics</i> , 125(1), 111-124.	Control de Inventario	Control de Inventario	Muestreo	Ecuaciones Algebraicas	Feedforward - MPC		x	x	No se considera	x	Estocástico		x		x
30	2013	WHITE, A. S.; CENSLIVE, M. Using control theory to optimise profit in APVIOBPCS inventory systems, 2013. <i>Journal of Manufacturing Systems</i> , vol. 32, no 4, p. 680-688.	Control de Inventario	Control de Inventario	Análogo	Función de Transformada de Laplace	Feedforward		x		No se considera	x	Determinística	x	x	x	x

NÚM	AÑO	REFERENCIA	ENTORNOS DE OPERACIÓN		MODELO DE CONTROL			CARACTERÍSTICAS									
			Contexto de Aplicación	Tipo de Problema	Método del Modelo	Matemática del Modelo	Técnica de Control	Multi-producto	Monoproducto	Pronostico	Lead Time	Costos	Demanda	Nivel de Servicio	Nivel de Inventario Deseado	MRP	Stock de Seguridad
31	2011	HAI, D. O. N. G.; HAO, ZHENG; PING, LI Yan. Model predictive control for inventory management in supply chain planning. <i>Procedia Engineering</i> , 2011, vol. 15, p. 1154-1159.	Control de Inventario	Control de Inventario	Análogo	Ecuaciones Diferenciales	MPC	x		x	No se considera	x	Determinística	x	x	X	
32	2012	FOUL, A.; TADJ, L.; HEDJAR, R. Adaptive control of inventory systems with unknown deterioration rate. <i>Journal of King Saud University-Science</i> , 2012, vol. 24, no 3, p. 215-220.	Control de Inventario	Control de Inventario	Análogo	Función de Transformada de Laplace	Adaptativo		x		No se considera	x	Determinística	x			X
33	2014	RAVANSHADNIA, M.; GHANBARI, M. A hybrid EOQ and fuzzy model to minimize the material inventory in ready mixed concrete plants. <i>En Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)</i> , 2014 IEEE International Conference on. IEEE, 2014. p. 526-530.	Control de Inventario	Control de Inventario	Análogo	Lógica Difusa	MPC		x		Constante	x	Determinística		x	X	
34	2014	SUBRAMANIAN, Kaushik; RAWLINGS, James B.; MARAVELIAS, Christos T. Economic model predictive control for inventory management in supply chains. <i>Computers &amp; Chemical Engineering</i> , 2014, vol. 64, p. 71-80.	Control de Inventario	Control de Inventario	Muestreo	Espacios de Estado	MPC	x			Variable	x	Estocástico				x

ANEXO 4. IMPLEMENTACIÓN PID AL PROCESO JS CON D1 - P1.

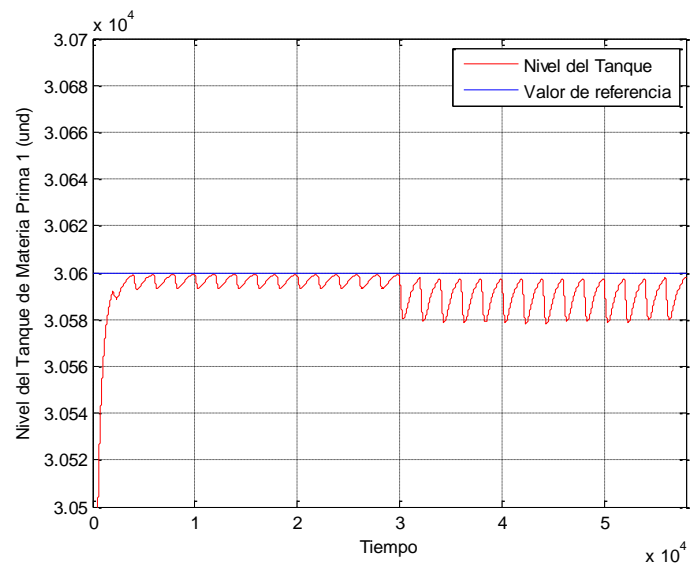


Ilustración 89 Variable MP 1 con PID en el proceso JS – D1 – P1.

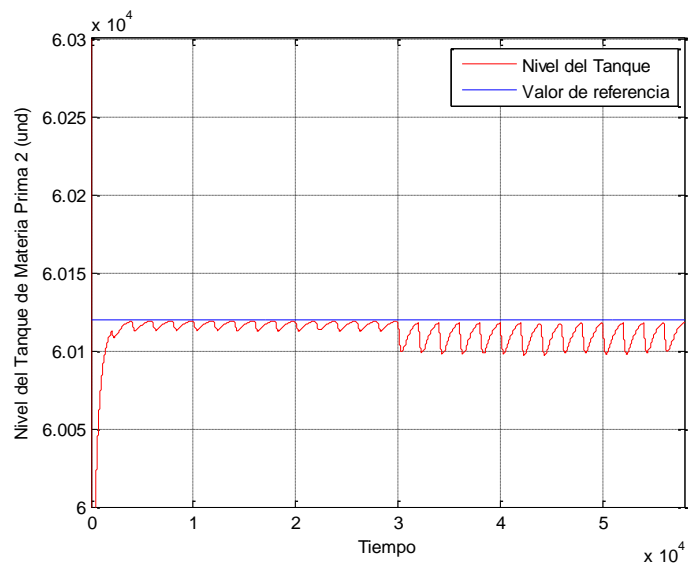


Ilustración 90 Variable MP 2 con PID en el proceso JS – D1 – P1.

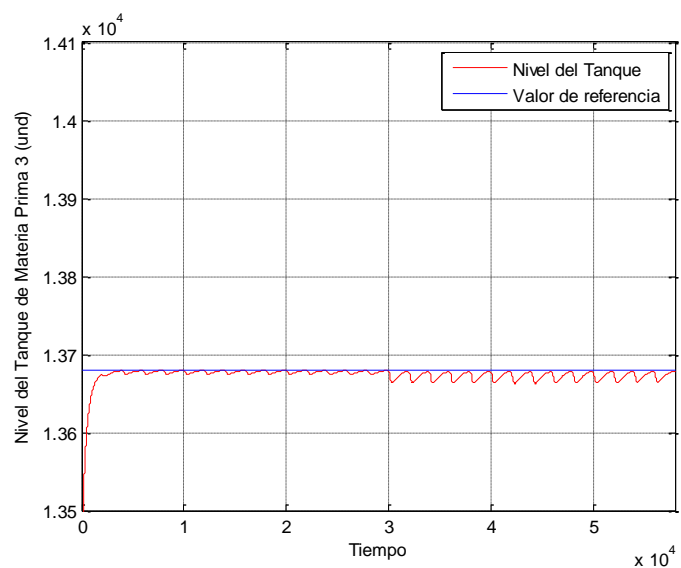


Ilustración 91 Variable MP 3 con PID en el proceso JS – D1 – P1.

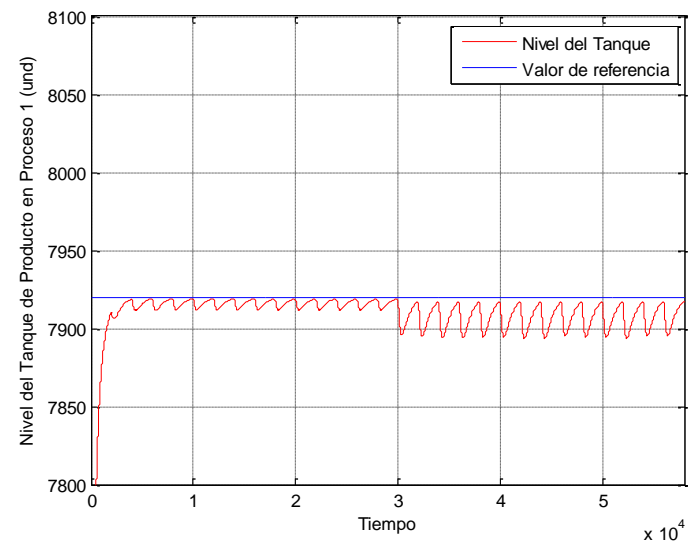


Ilustración 92 Variable PP 1 con PID en el proceso JS – D1 – P1.

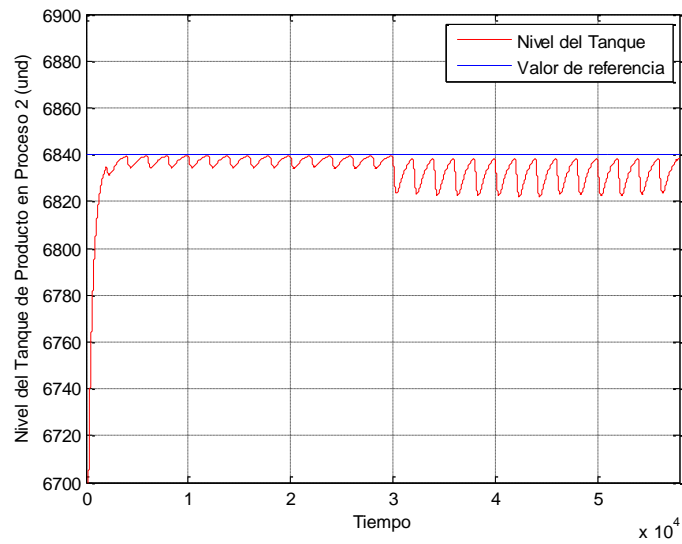


Ilustración 93 Variable PP 2 con PID en el proceso JS – D1 – P1.

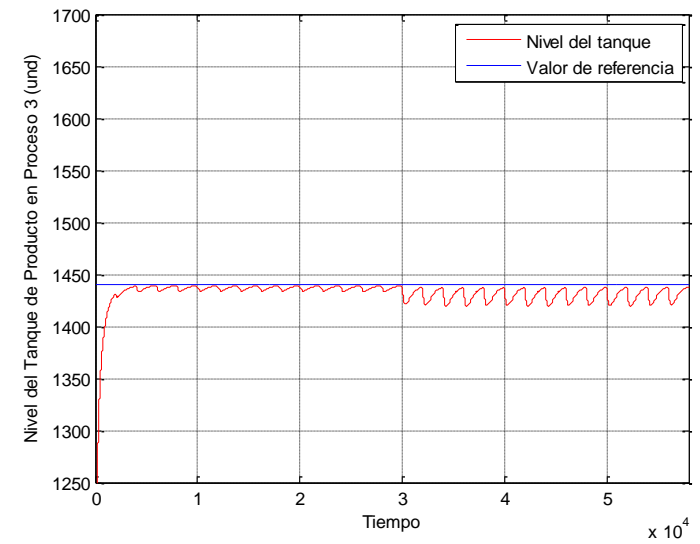


Ilustración 94 Variable PP 3 con PID en el proceso JS – D1 – P1.

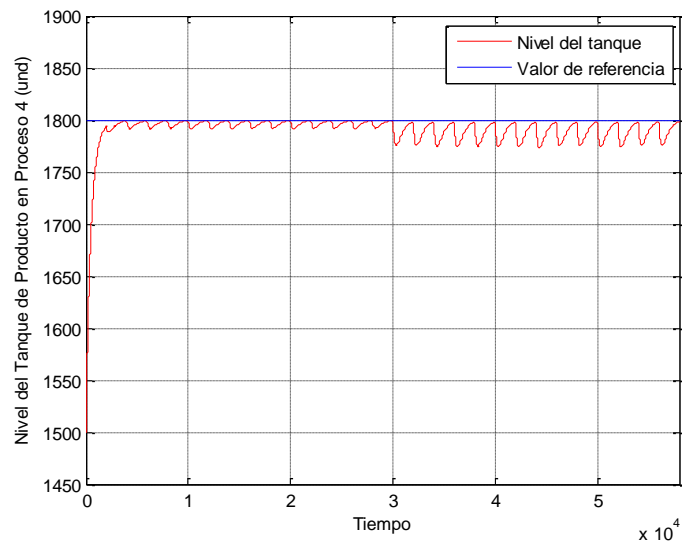


Ilustración 95 Variable PP 4 con PID en el proceso JS – D1 – P1.

ANEXO 5. IMPLEMENTACIÓN PID AL PROCESO JS CON D1 – P2.

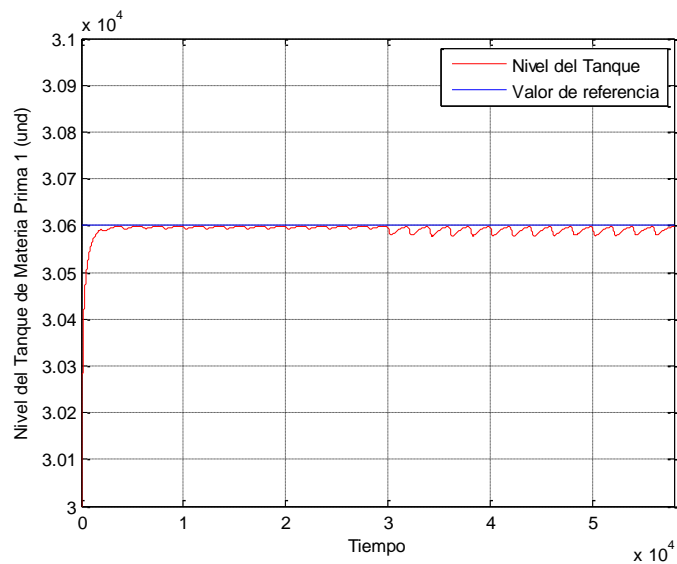


Ilustración 96 Variable MP 1 con PID en el proceso JS – D1 – P2.

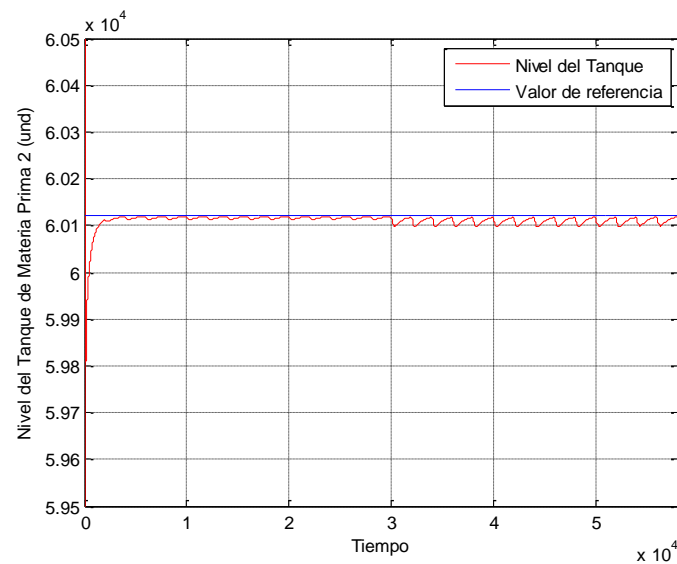


Ilustración 97 Variable MP 2 con PID en el proceso JS – D1 – P2.

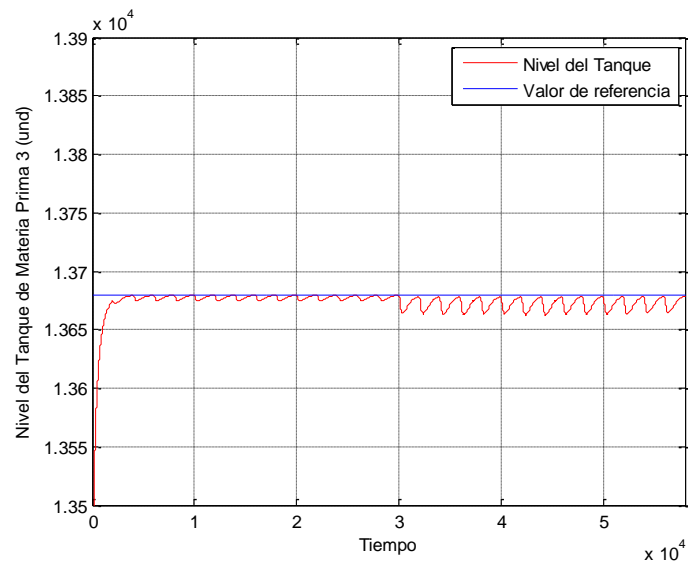


Ilustración 98 Variable MP 3 con PID en el proceso JS – D1 – P2.

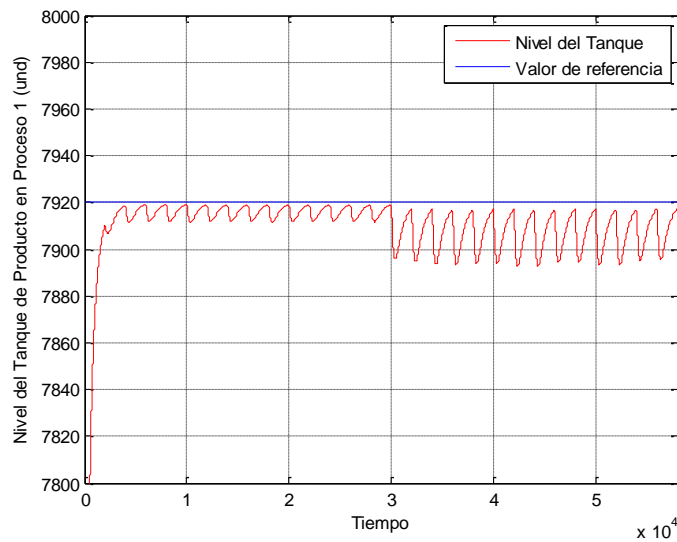


Ilustración 99 Variable PP 1 con PID en el proceso JS – D1 – P2.



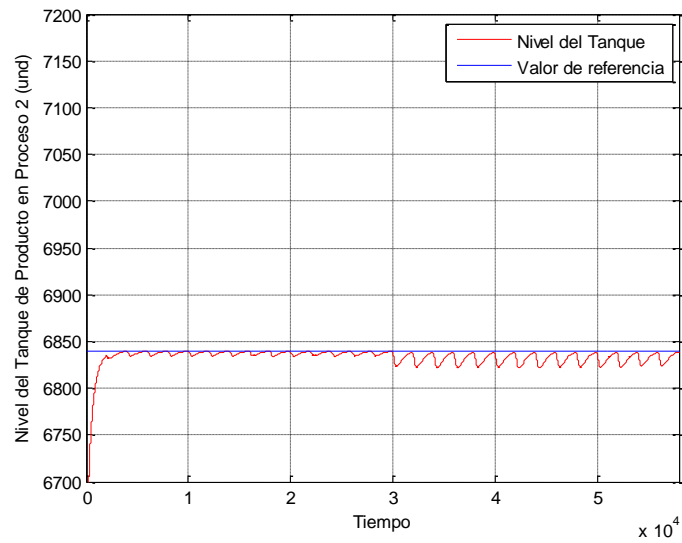


Ilustración 100 Variable PP 2 con PID en el proceso JS – D1 – P2.

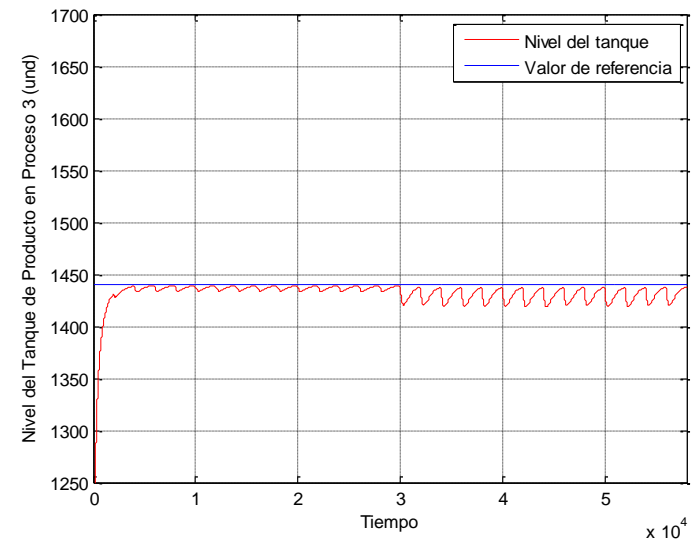


Ilustración 101 Variable PP 3 con PID en el proceso JS – D1 – P2.

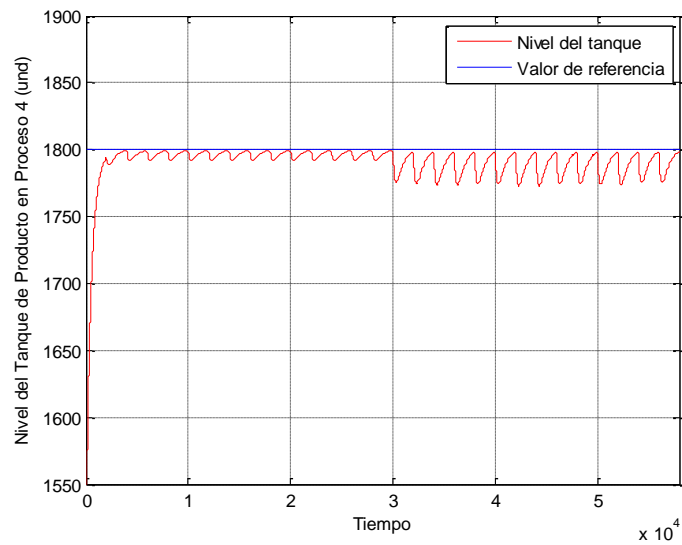


Ilustración 102 Variable PP 4 con PID en el proceso JS – D1 – P2.

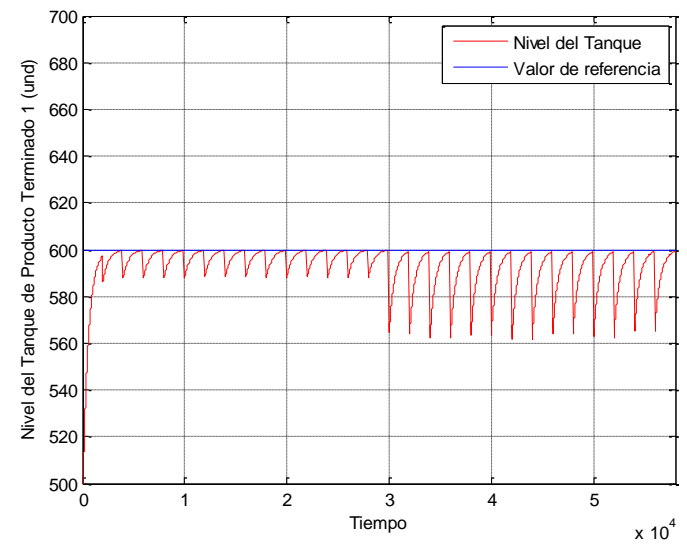


Ilustración 103 Variable PT 1 con PID en el proceso JS – D1 – P2.

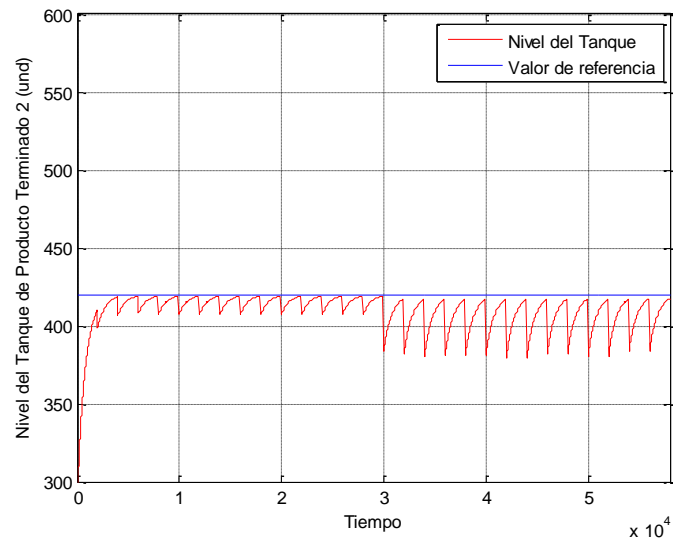


Ilustración 104 Variable PT 2 con PID en el proceso JS – D1 – P2.

#### ANEXO 6. IMPLEMENTACIÓN PID AL PROCESO JS CON D1 – P3.

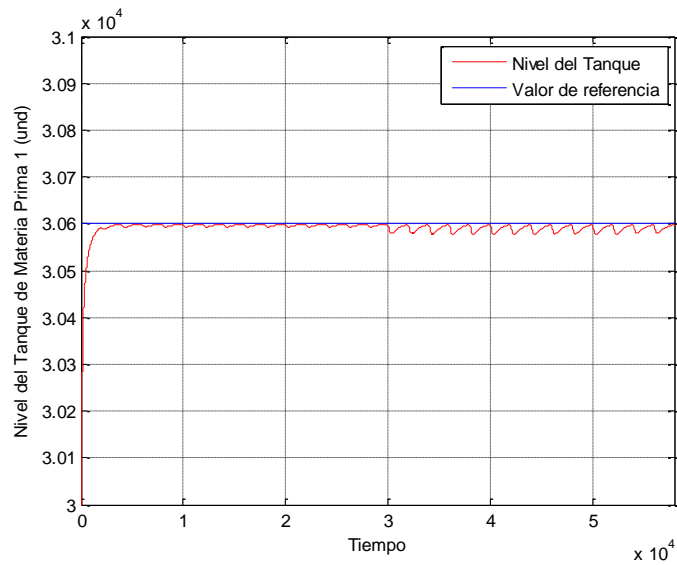


Ilustración 105 Variable MP 1 con PID en el proceso JS – D1 – P3.

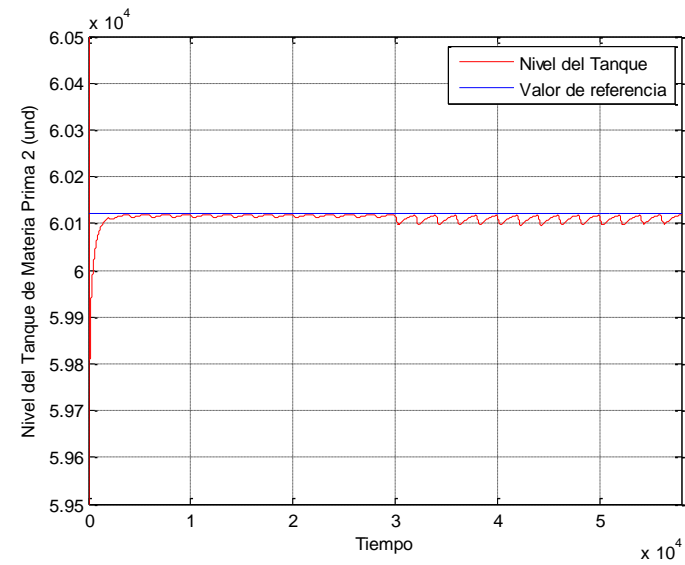


Ilustración 106 Variable MP 2 con PID en el proceso JS – D1 – P3.

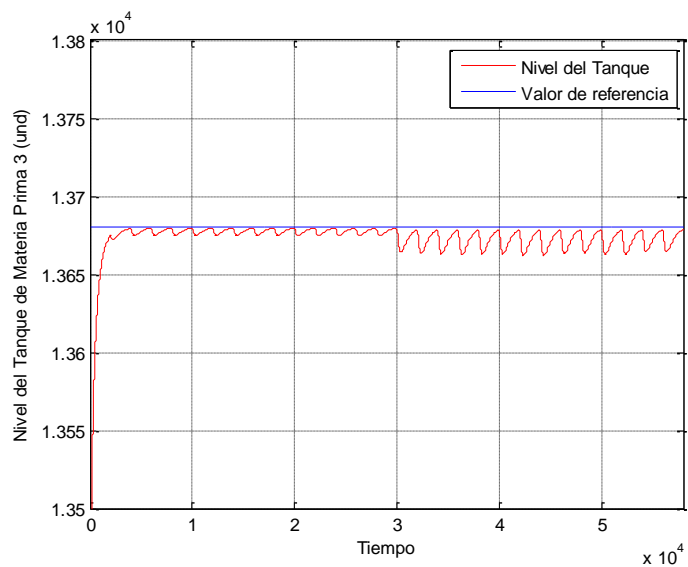


Ilustración 107 Variable MP 3 con PID en el proceso JS – D1 – P3.

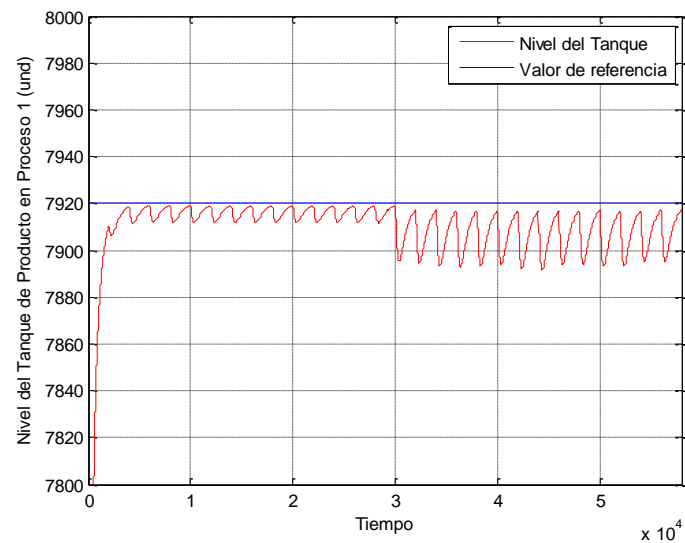


Ilustración 108 Variable PP 1 con PID en el proceso JS – D1 – P3.

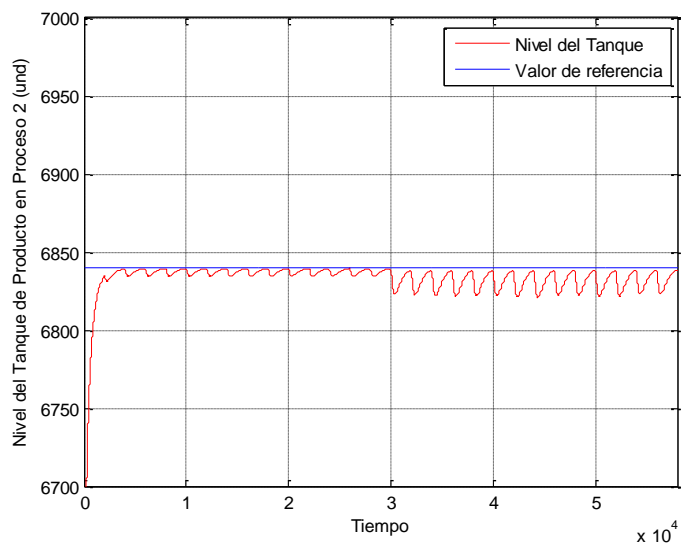


Ilustración 109 Variable PP 2 con PID en el proceso JS – D1 – P3.

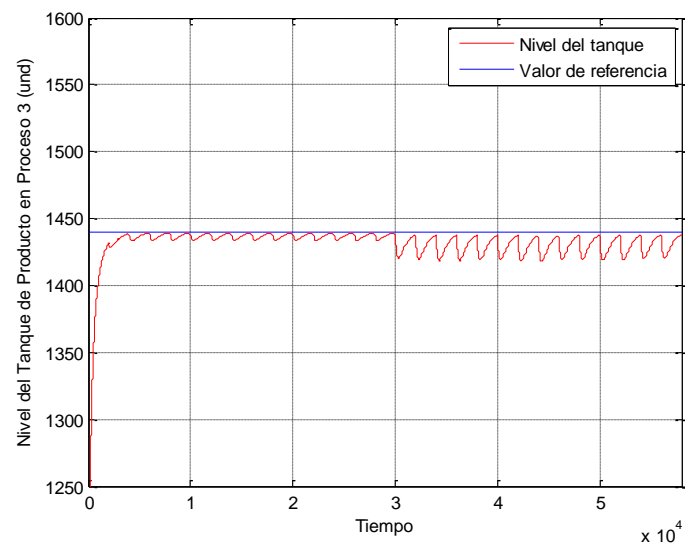


Ilustración 110 Variable PP 3 con PID en el proceso JS – D1 – P3.

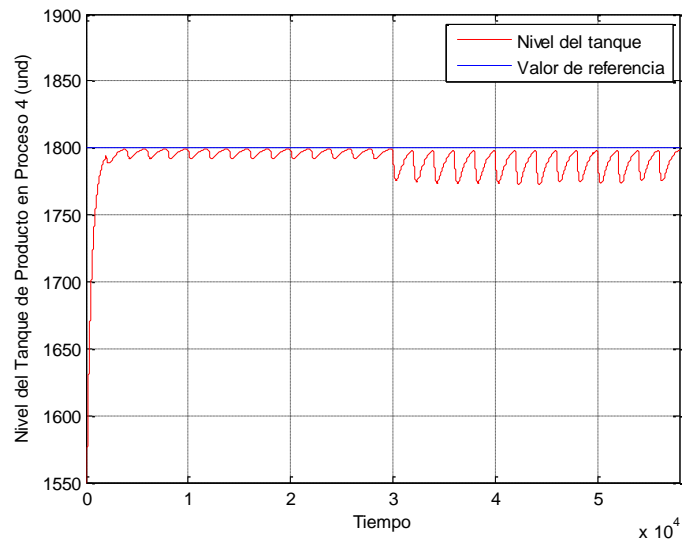


Ilustración 111 Variable PP 4 con PID en el proceso JS – D1 – P3.

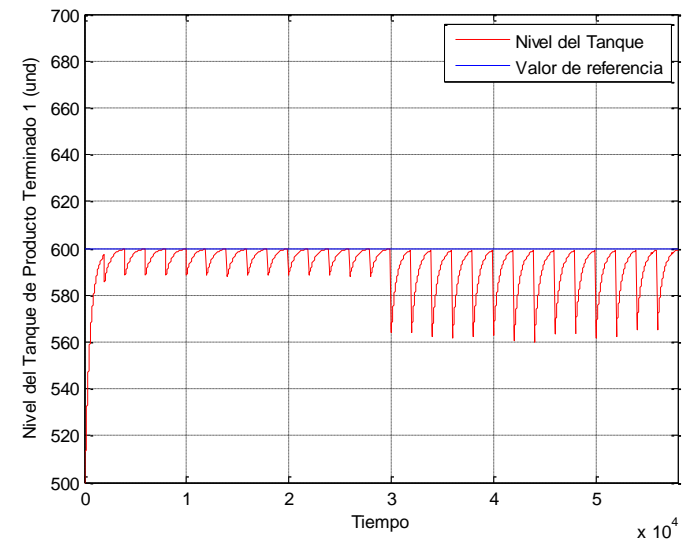


Ilustración 112 Variable PT 1 con PID en el proceso JS – D1 – P3.

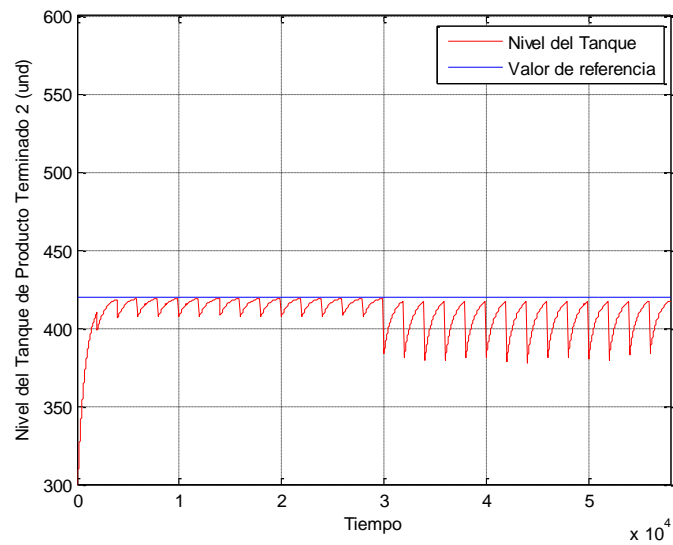


Ilustración 113 Variable PT 2 con PID en el proceso JS – D1 – P3.

ANEXO 7. IMPLEMENTACIÓN PID AL PROCESO JS CON D2 – P1.

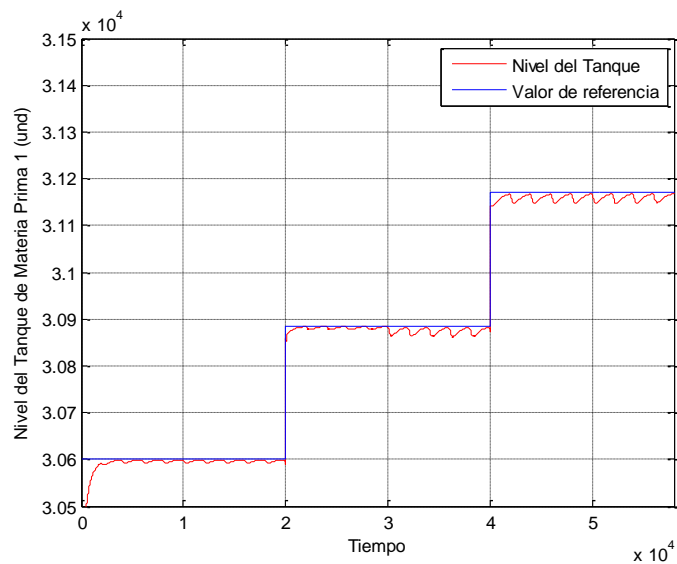


Ilustración 114 Variable MP 1 con PID en el proceso JS – D2 – P1.

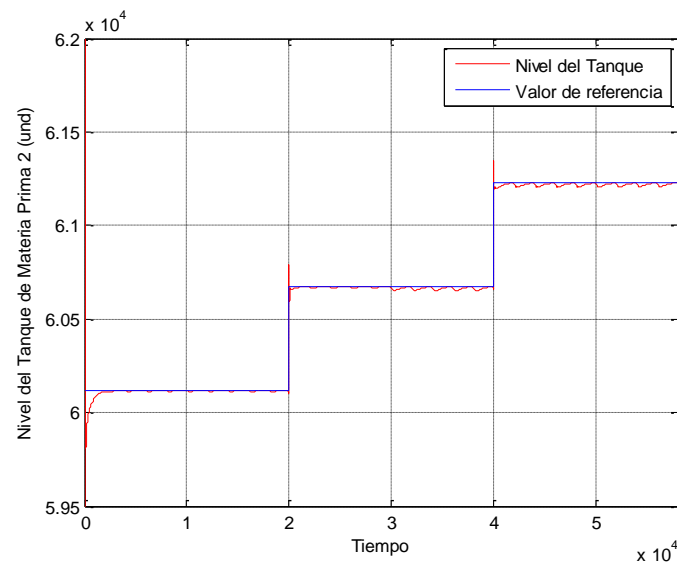


Ilustración 115 Variable MP 2 con PID en el proceso JS – D2 – P1.

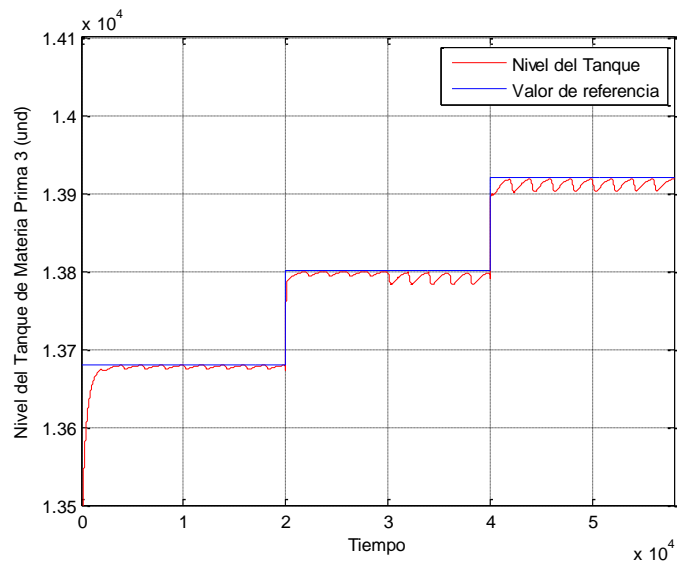


Ilustración 116 Variable MP 3 con PID en el proceso JS – D2 – P1.

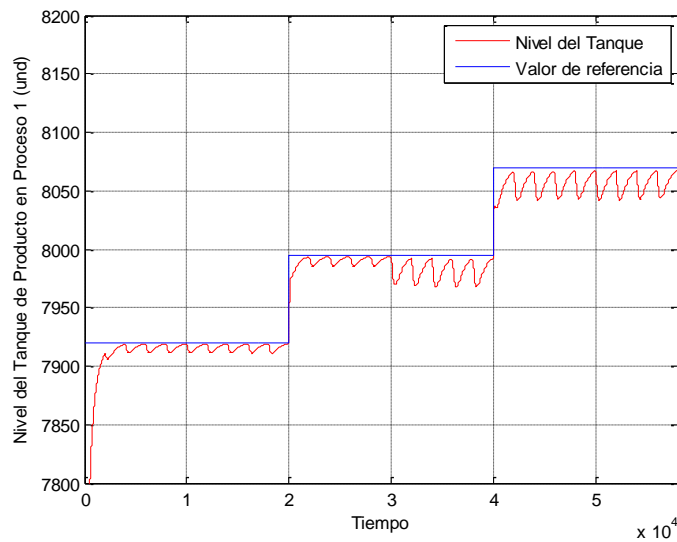


Ilustración 117 Variable PP 1 con PID en el proceso JS – D2 – P1.

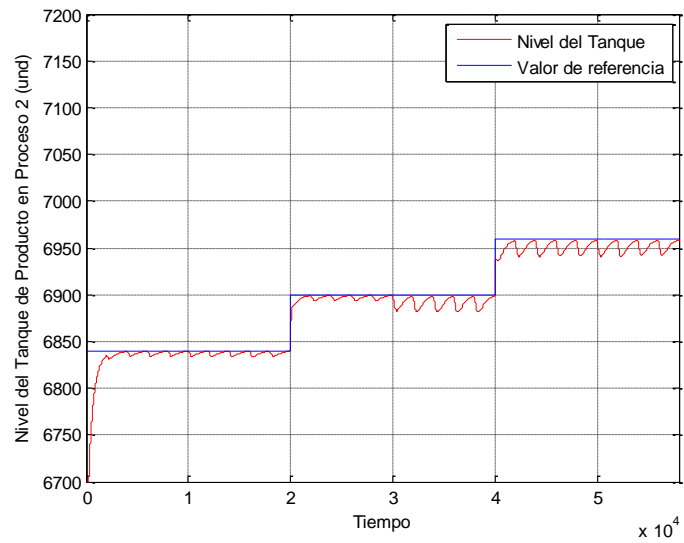


Ilustración 118 Variable PP 2 con PID en el proceso JS – D2 – P1.

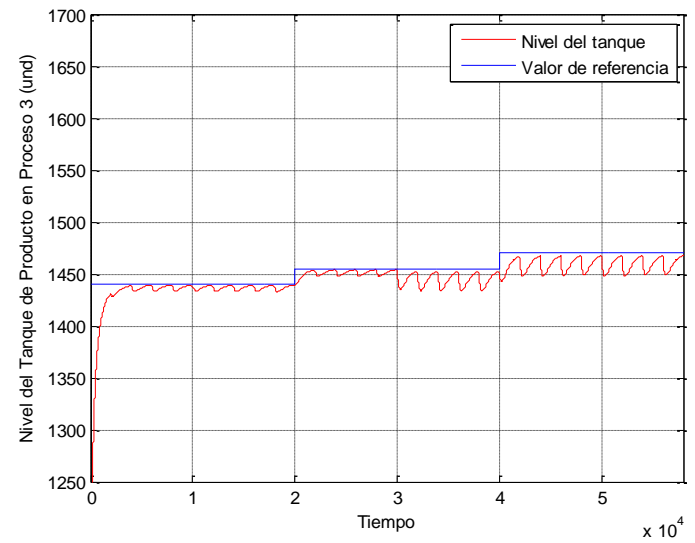


Ilustración 119 Variable PP 3 con PID en el proceso JS – D2 – P1.

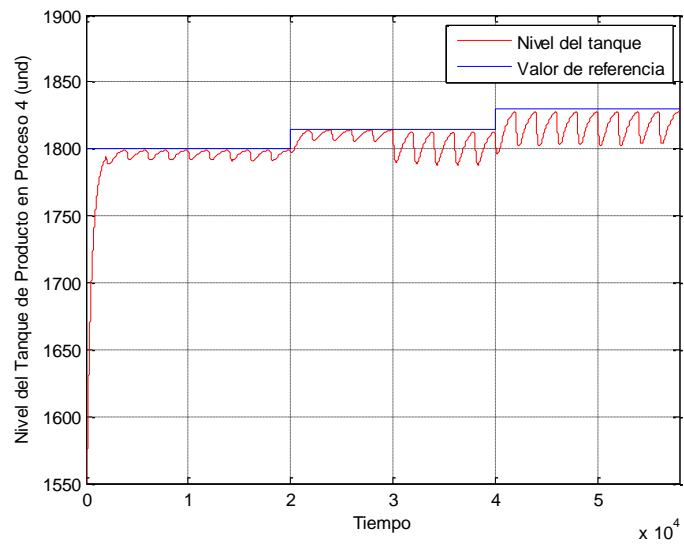


Ilustración 120 Variable PP 4 con PID en el proceso JS – D2 – P1.

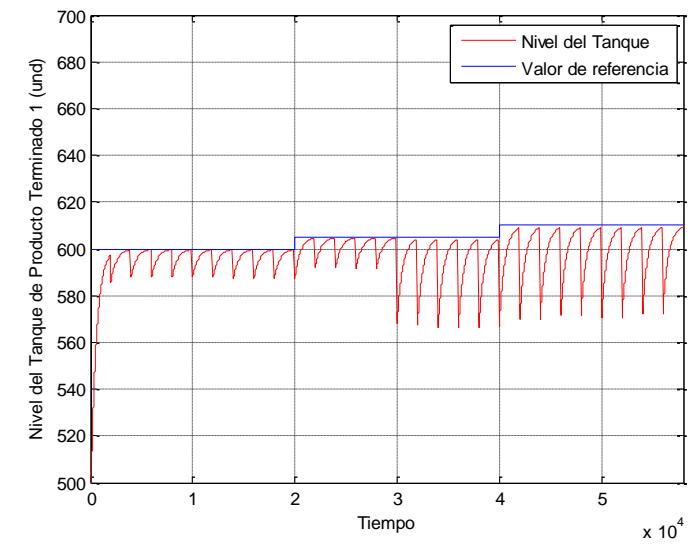


Ilustración 121 Variable PT 1 con PID en el proceso JS – D2 – P1.

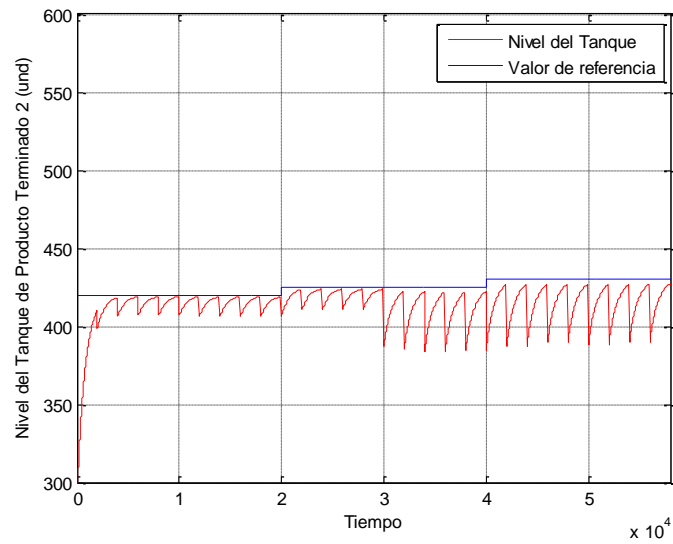


Ilustración 122 Variable PT 2 con PID en el proceso JS – D2 – P1.

## ANEXO 8. IMPLEMENTACIÓN PID AL PROCESO JS CON D2 – P2.

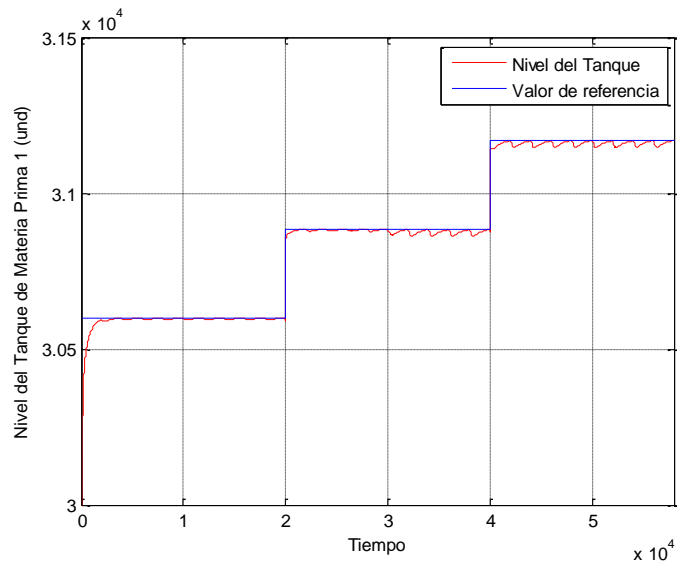


Ilustración 123 Variable MP 1 con PID en el proceso JS – D2 – P2.

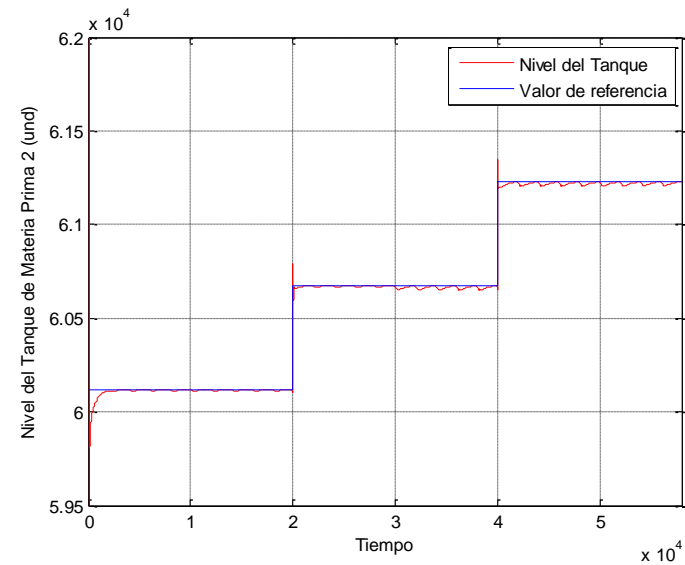


Ilustración 124 Variable MP 2 con PID en el proceso JS – D2 – P2.

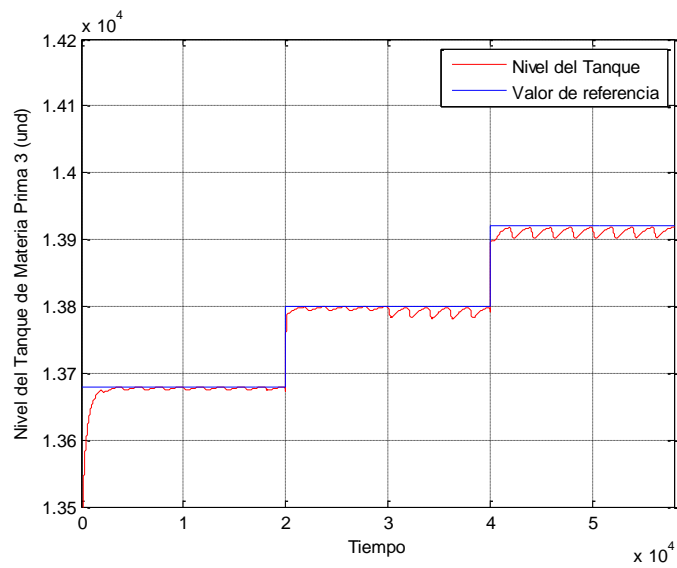


Ilustración 125 Variable MP 3 con PID en el proceso JS – D2 – P2.

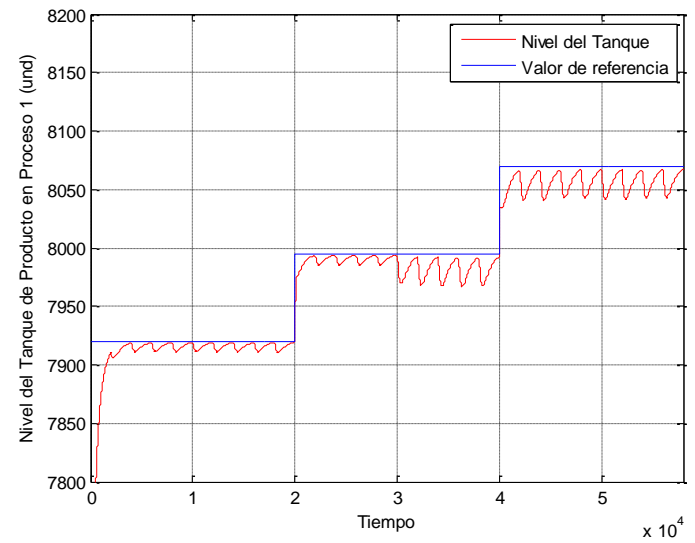


Ilustración 126 Variable PP 1 con PID en el proceso JS – D2 – P2.

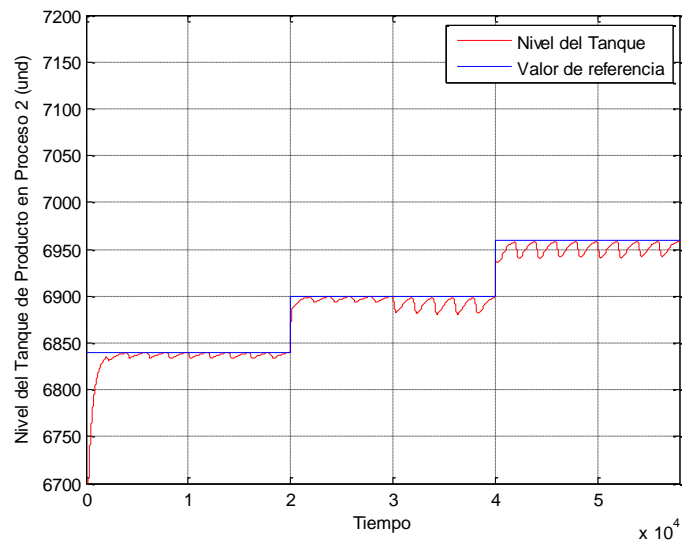


Ilustración 127 Variable PP 2 con PID en el proceso JS – D2 – P2.

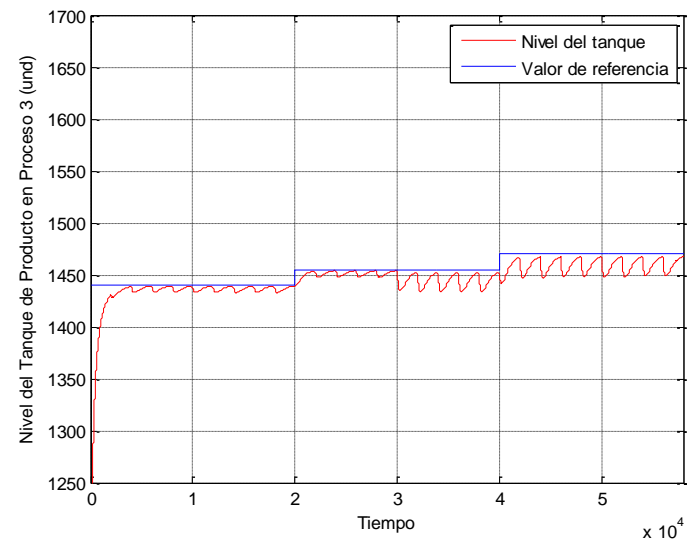


Ilustración 128 Variable PP 3 con PID en el proceso JS – D2 – P2.



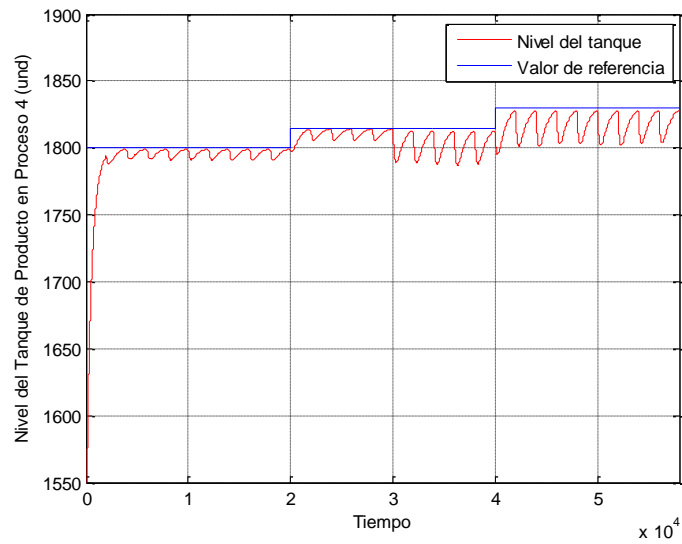


Ilustración 129 Variable PP 4 con PID en el proceso JS – D2 – P2.

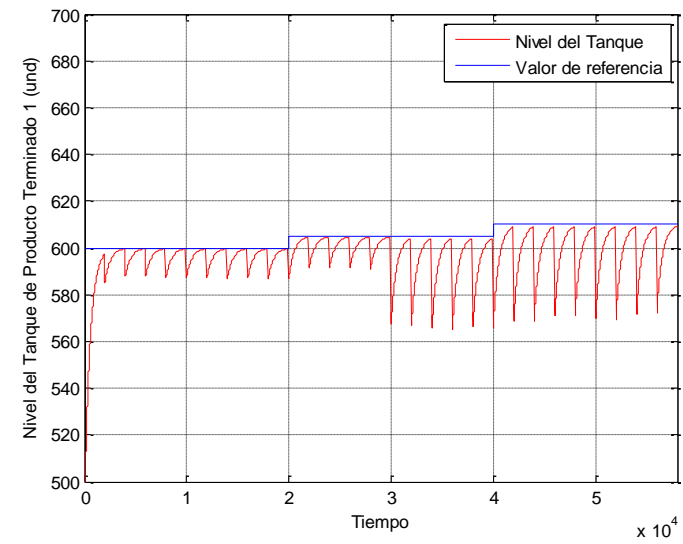


Ilustración 130 Variable PT 1 con PID en el proceso JS – D2 – P2.

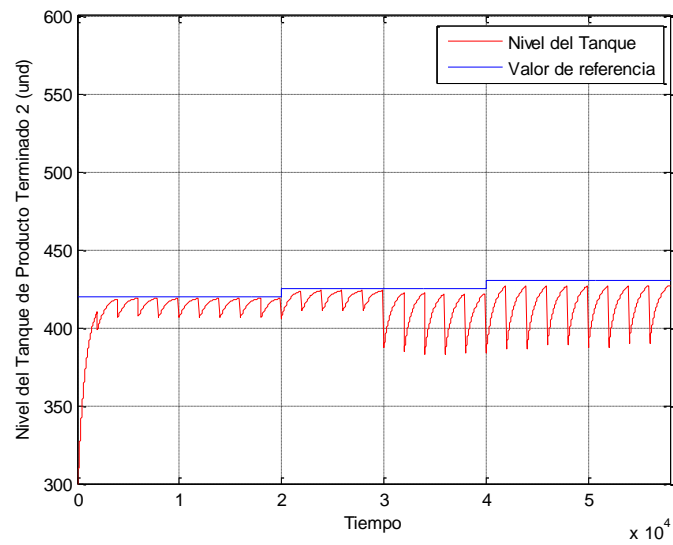


Ilustración 131 Variable PT 2 con PID en el proceso JS – D2 – P2.

ANEXO 9. IMPLEMENTACIÓN PID AL PROCESO JS CON D2 – P3.

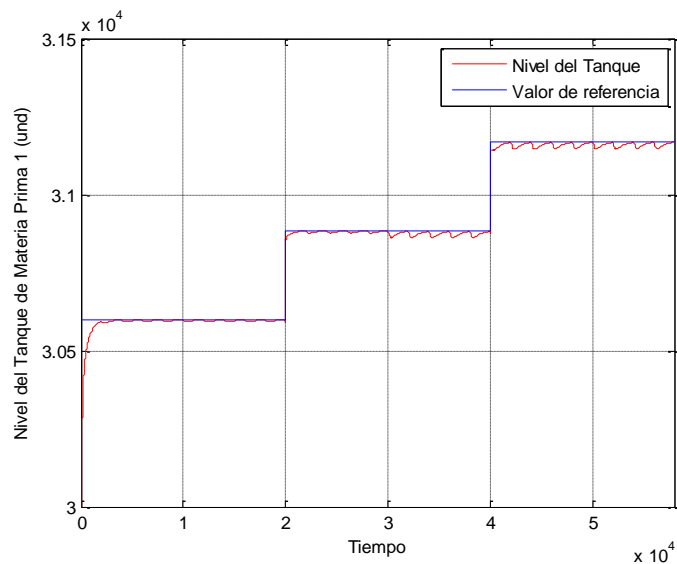


Ilustración 132 Variable MP 1 con PID en el proceso JS – D2 – P3.

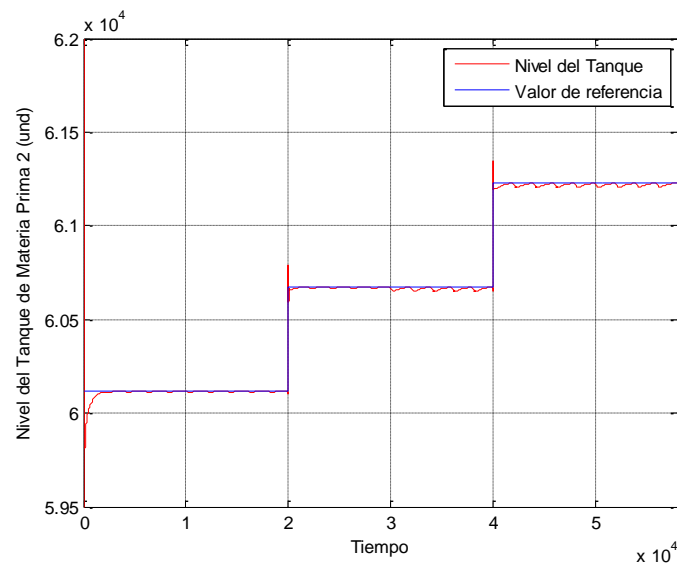


Ilustración 133 Variable MP 2 con PID en el proceso JS – D2 – P3.

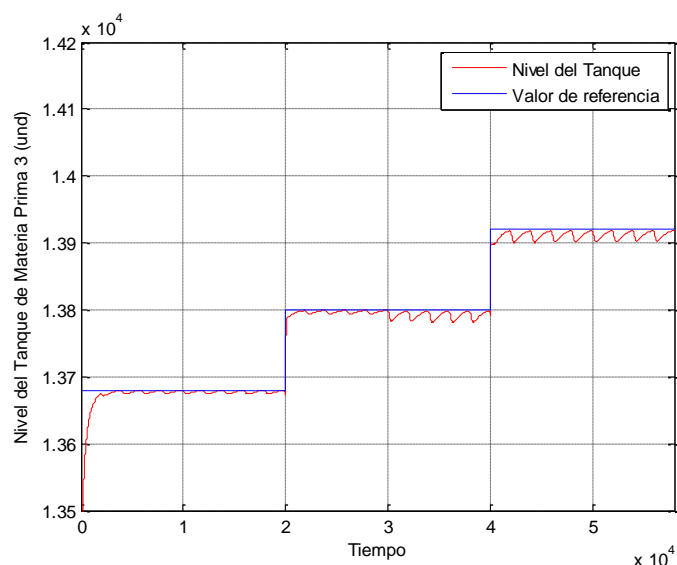


Ilustración 134 Variable MP 3 con PID en el proceso JS – D2 – P3.

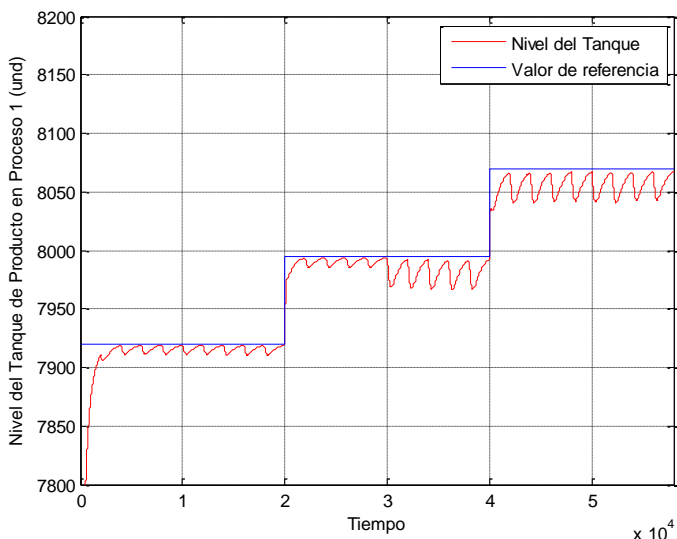


Ilustración 135 Variable PP 1 con PID en el proceso JS – D2 – P3.

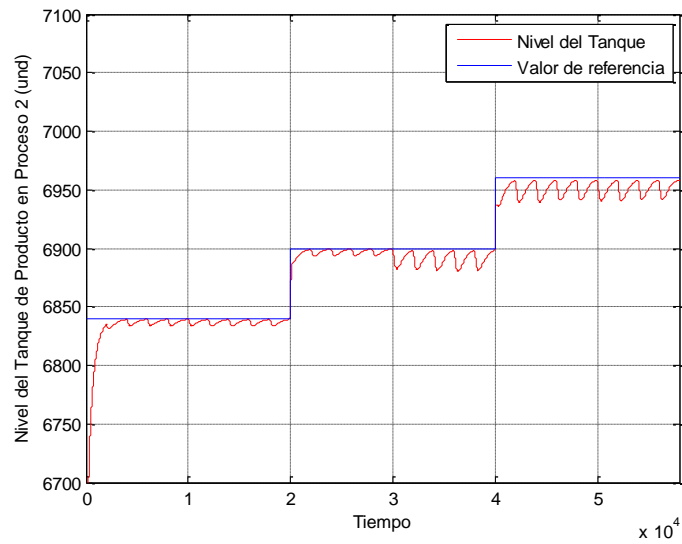


Ilustración 136 Variable PP 2 con PID en el proceso JS – D2 – P3.

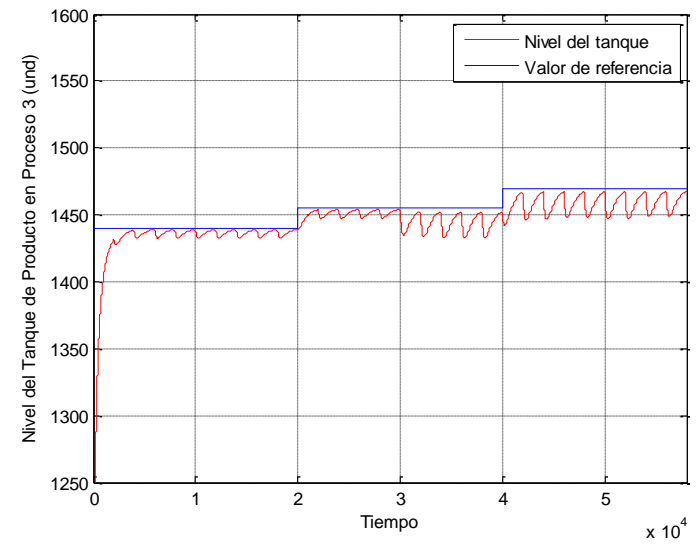


Ilustración 137 Variable PP 3 con PID en el proceso JS – D2 – P3.

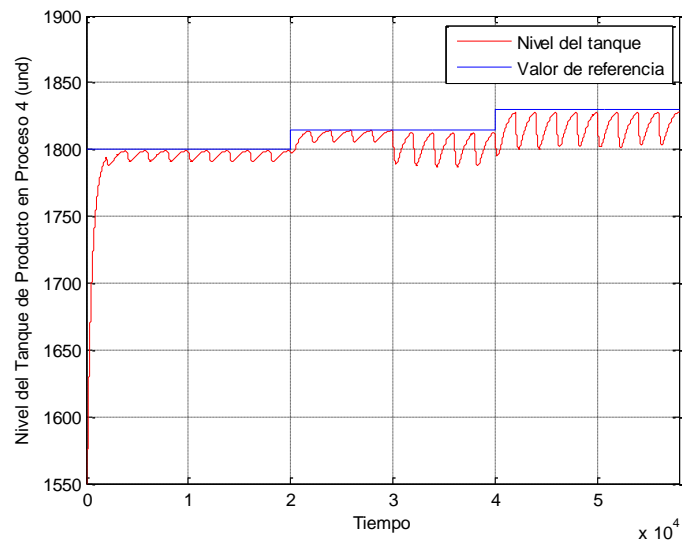


Ilustración 138 Variable PP 4 con PID en el proceso JS – D2 – P3.

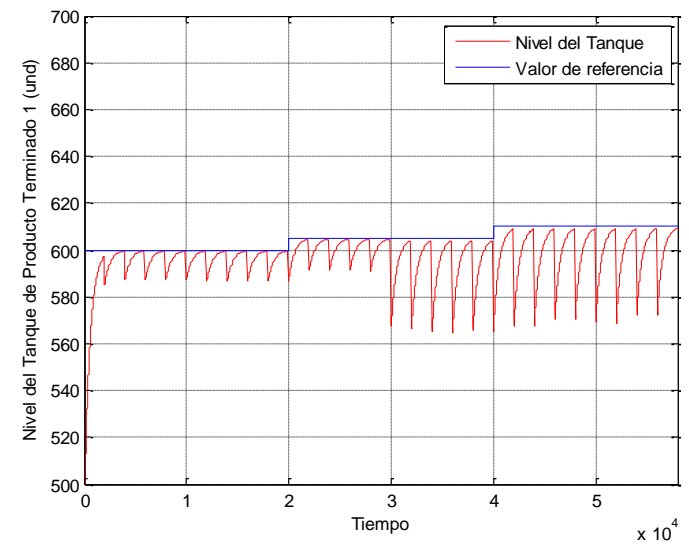


Ilustración 139 Variable PT 1 con PID en el proceso JS – D2 – P3.

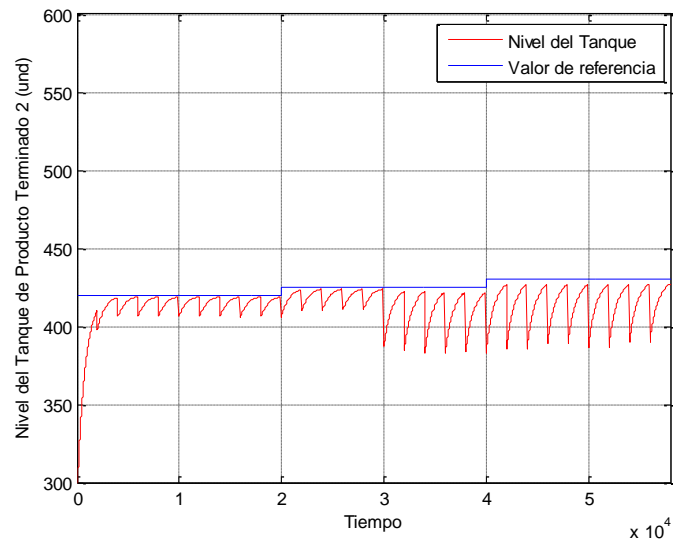


Ilustración 140 Variable PT 2 con PID en el proceso JS – D2 – P3.

#### ANEXO 10. IMPLEMENTACIÓN PID AL PROCESO JS CON D3 – P1.

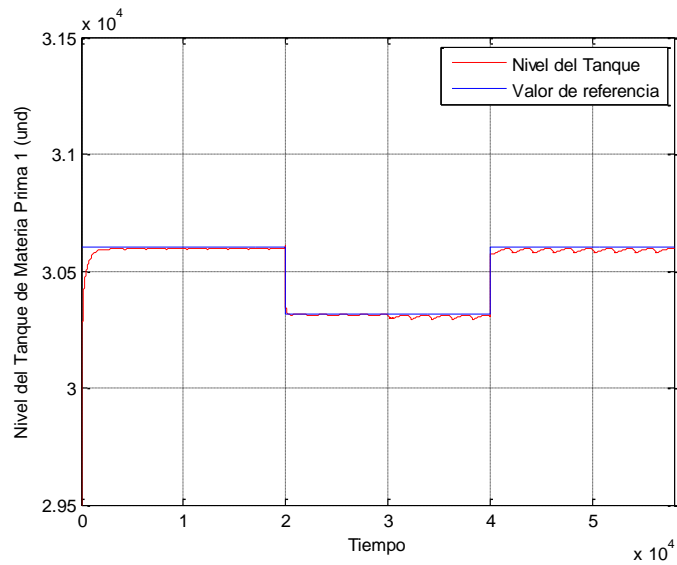


Ilustración 141 Variable MP 1 con PID en el proceso JS – D3 – P1.

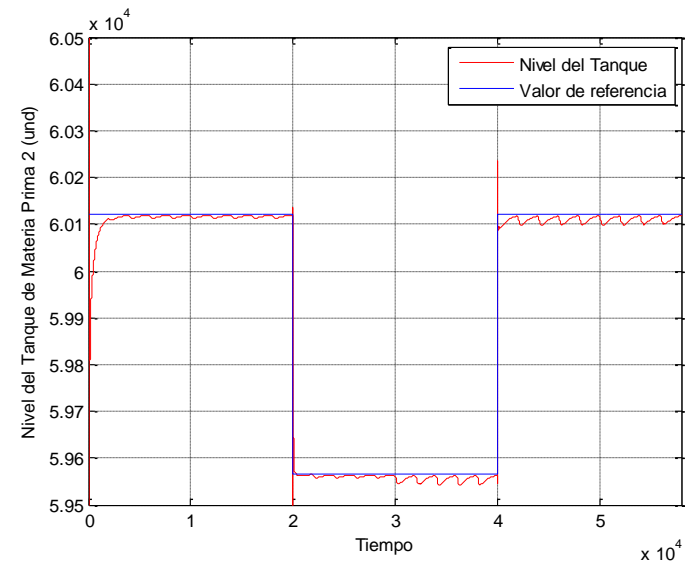


Ilustración 142 Variable MP 2 con PID en el proceso JS – D3 – P1.

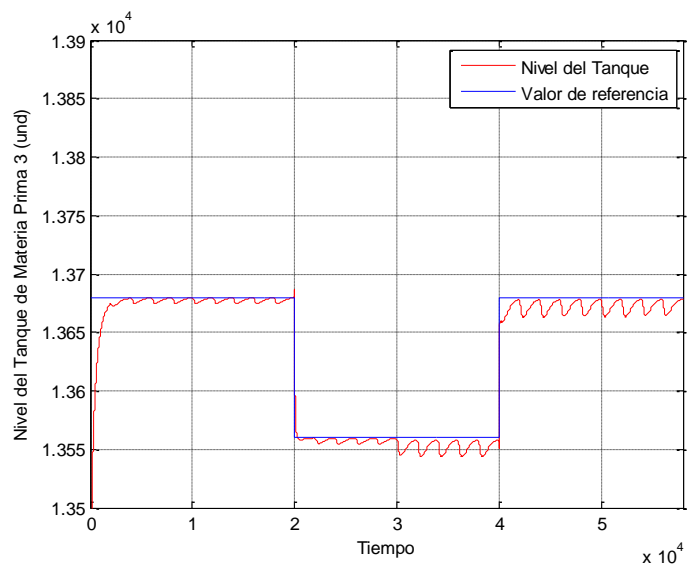


Ilustración 143 Variable MP 3 con PID en el proceso JS – D3 – P1.

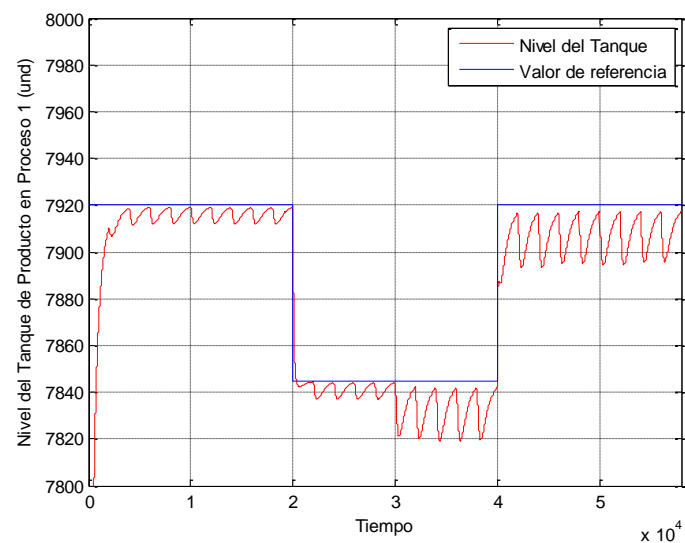


Ilustración 144 Variable PP 1 con PID en el proceso JS – D3 – P1.

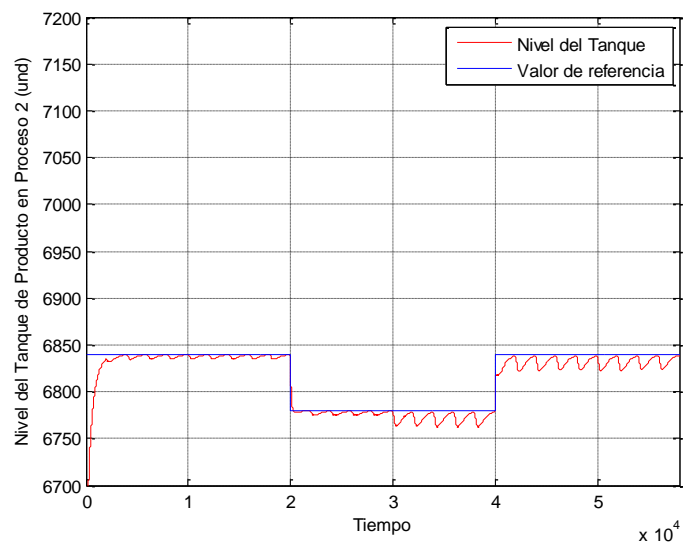


Ilustración 145 Variable PP 2 con PID en el proceso JS – D3 – P1.

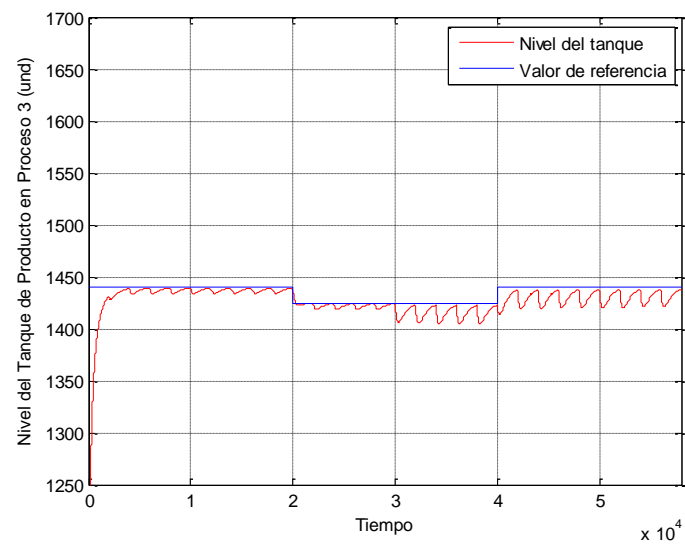


Ilustración 146 Variable PP 3 con PID en el proceso JS – D3 – P1.

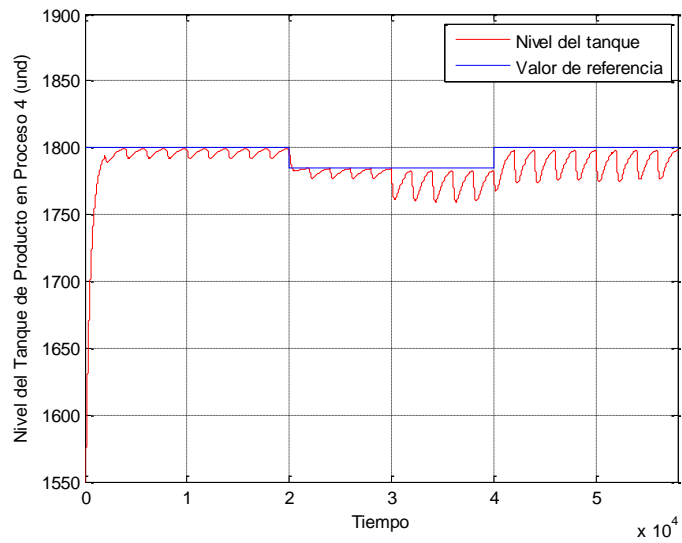


Ilustración 147 Variable PP 4 con PID en el proceso JS – D3 – P1.

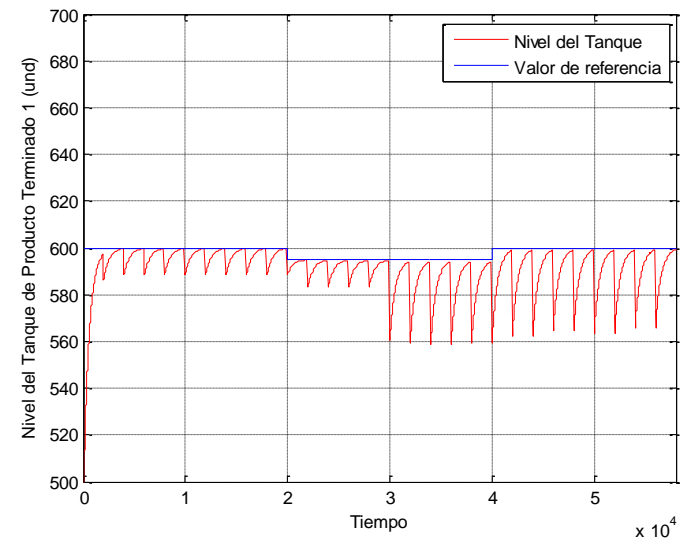


Ilustración 148 Variable PT 1 con PID en el proceso JS – D3 – P1.

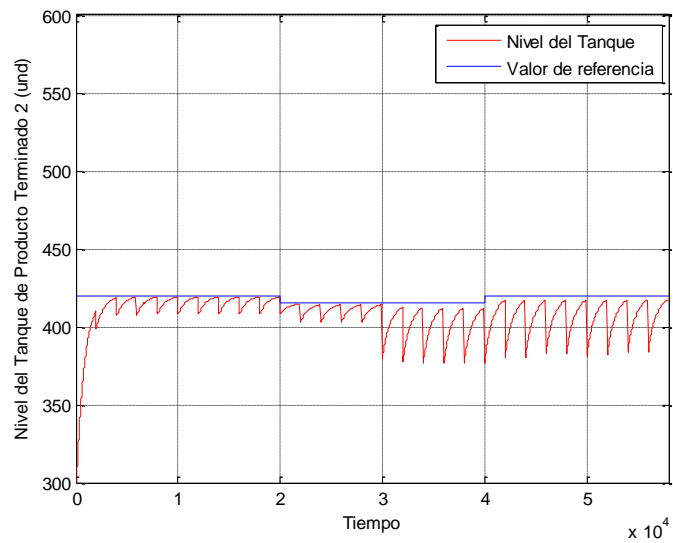


Ilustración 149 Variable PT 2 con PID en el proceso JS – D3 – P1.

ANEXO 11. IMPLEMENTACIÓN PID AL PROCESO JS CON D3 – P2.

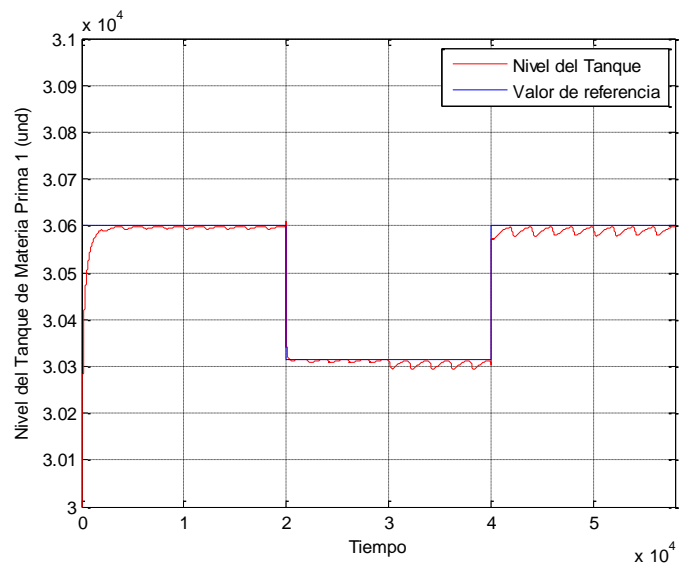


Ilustración 150 Variable MP 1 con PID en el proceso JS – D3 – P2.

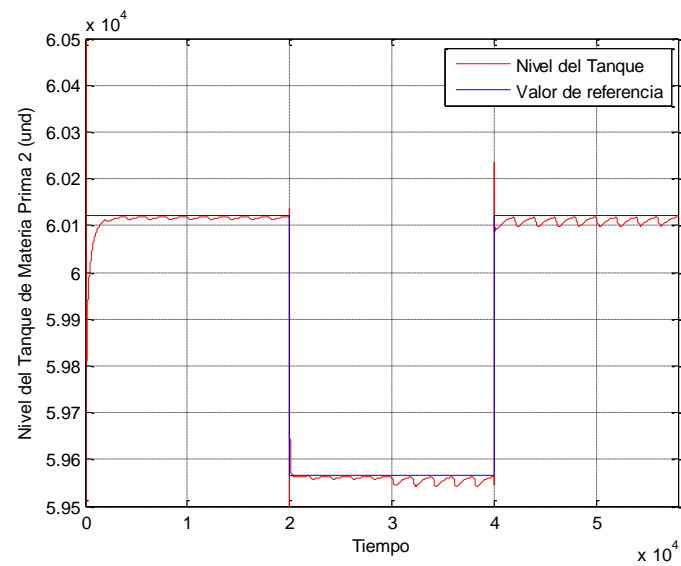


Ilustración 151 Variable MP 2 con PID en el proceso JS – D3 – P2.

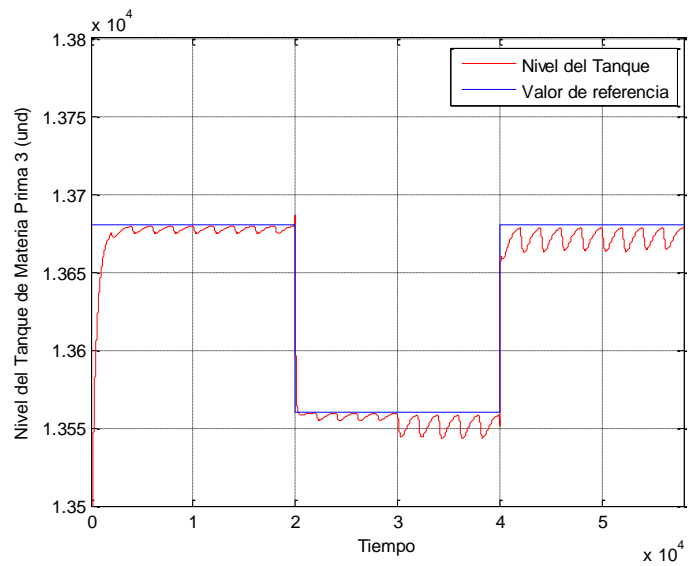


Ilustración 152 Variable MP 3 con PID en el proceso JS – D3 – P2.

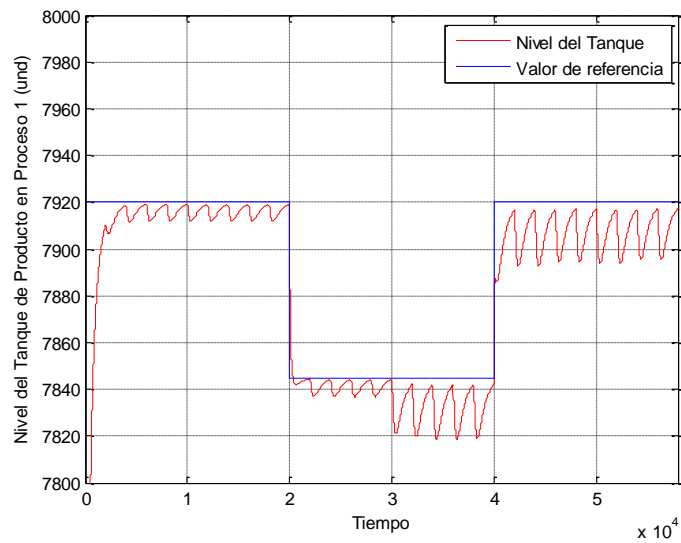


Ilustración 153 Variable PP 1 con PID en el proceso JS – D3 – P2.

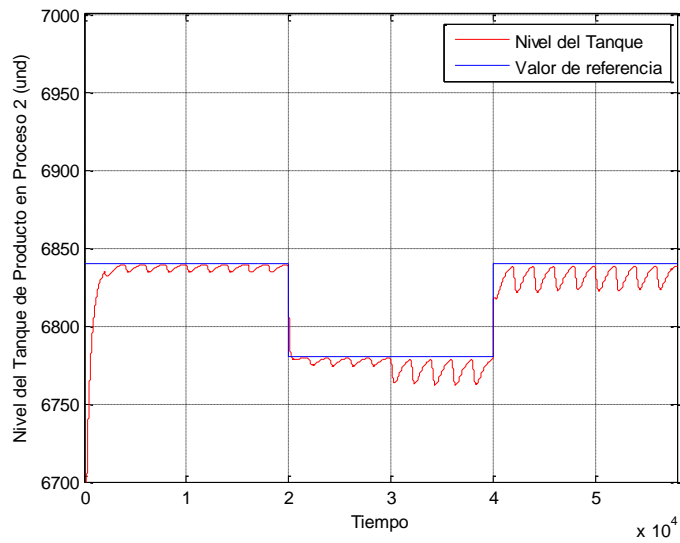


Ilustración 154 Variable PP 2 con PID en el proceso JS – D3 – P2.

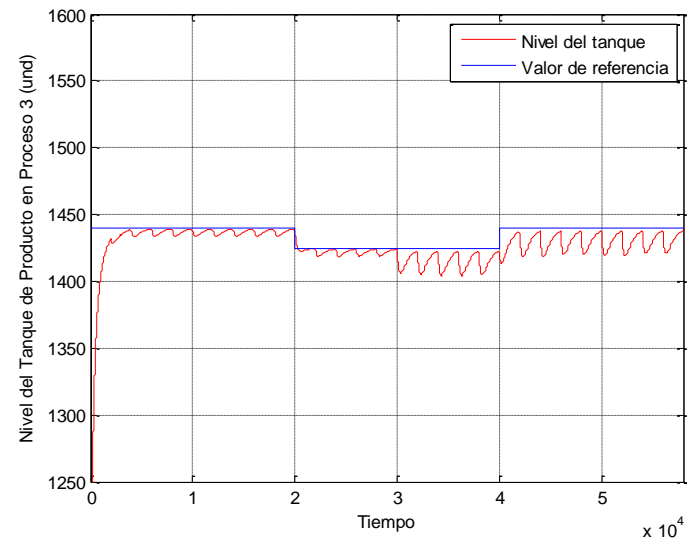


Ilustración 155 Variable PP 3 con PID en el proceso JS – D3 – P2.

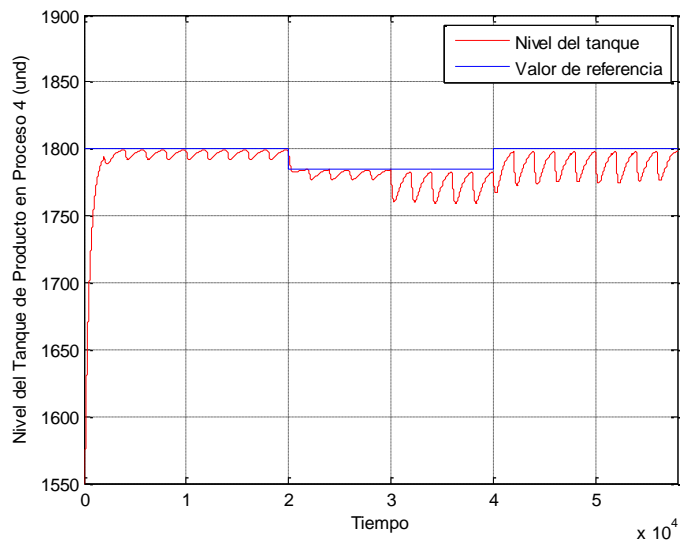


Ilustración 156 Variable PP 4 con PID en el proceso JS – D3 – P2.

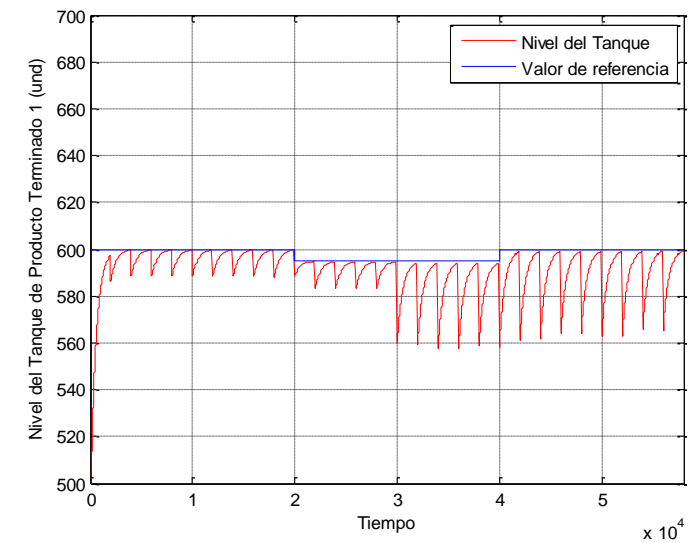


Ilustración 157 Variable PT 1 con PID en el proceso JS – D3 – P2.



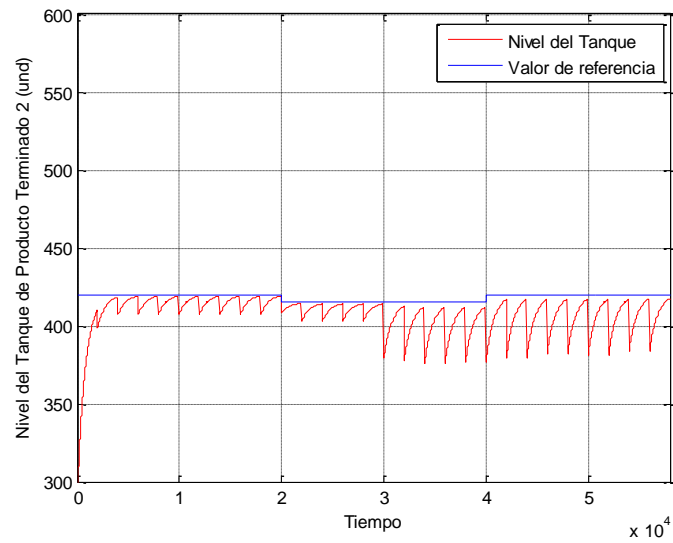


Ilustración 158 Variable PT 2 con PID en el proceso JS – D3 – P2.

## ANEXO 12. IMPLEMENTACIÓN PID AL PROCESO JS CON D3 – P3.

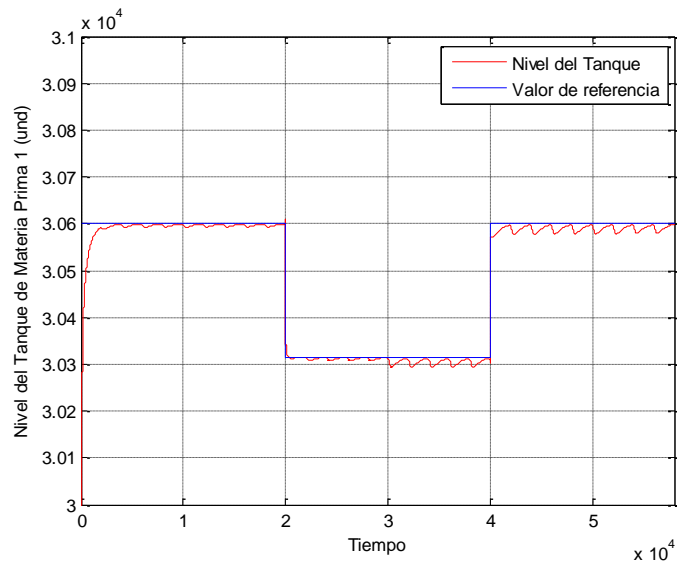


Ilustración 159 Variable MP 1 con PID en el proceso JS – D3 – P3.

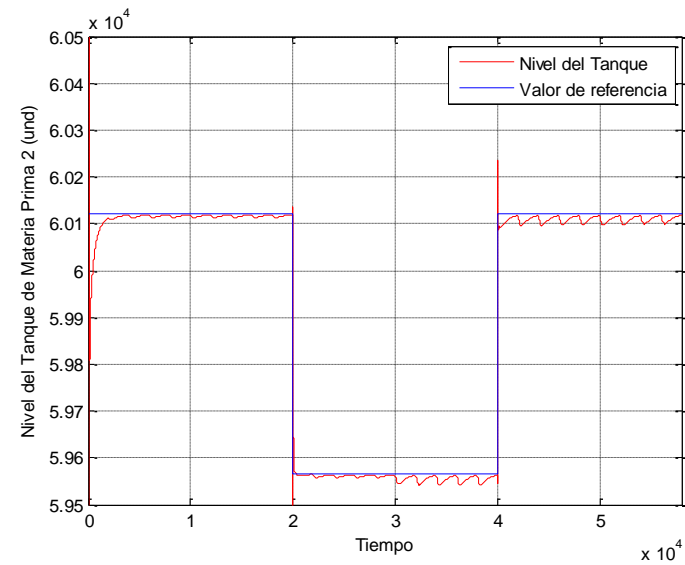


Ilustración 160 Variable MP 2 con PID en el proceso JS – D3 – P3.

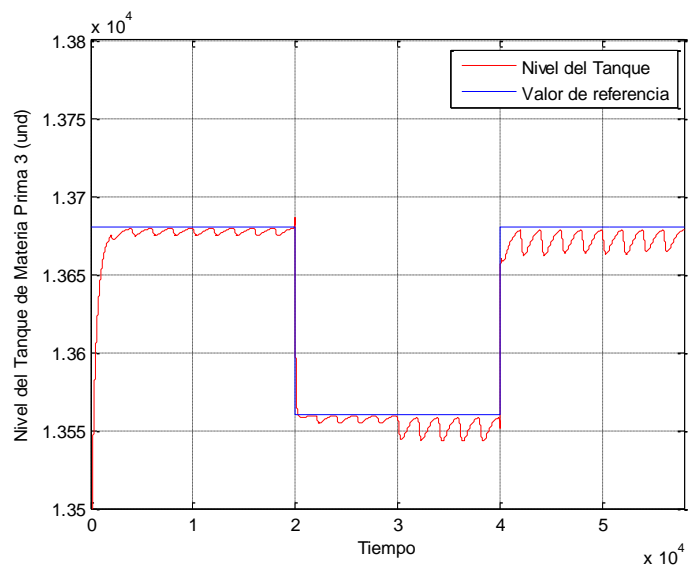


Ilustración 161 Variable MP 3 con PID en el proceso JS - D3 - P3.

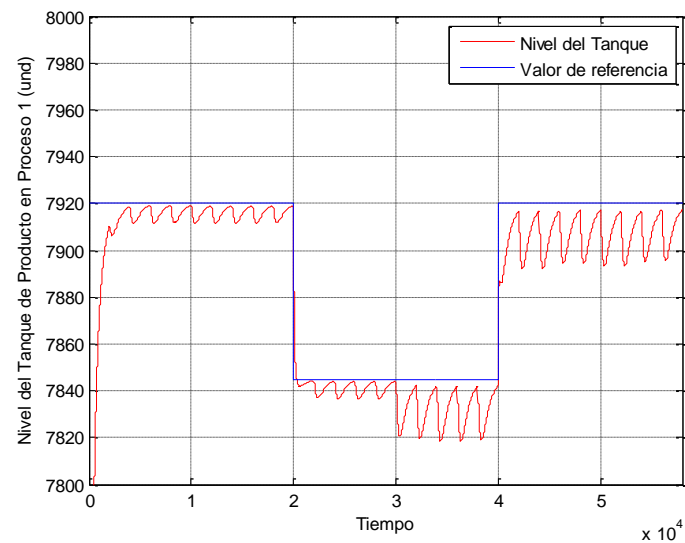


Ilustración 162 Variable PP 1 con PID en el proceso JS - D3 - P3.

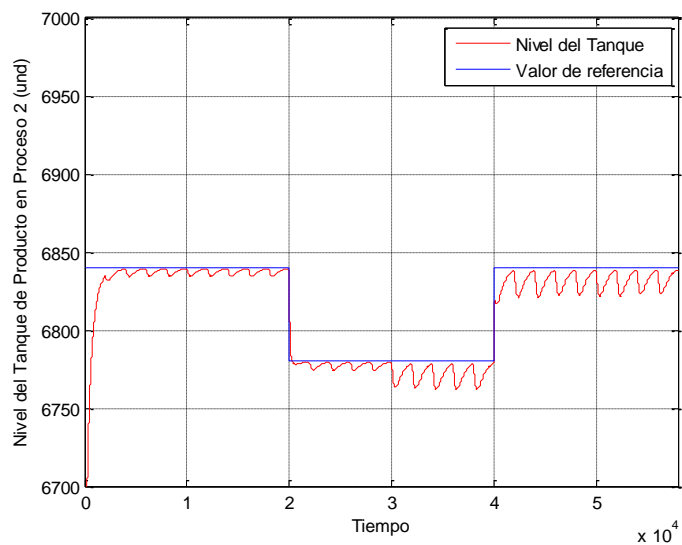


Ilustración 163 Variable PP 2 con PID en el proceso JS - D3 - P3.

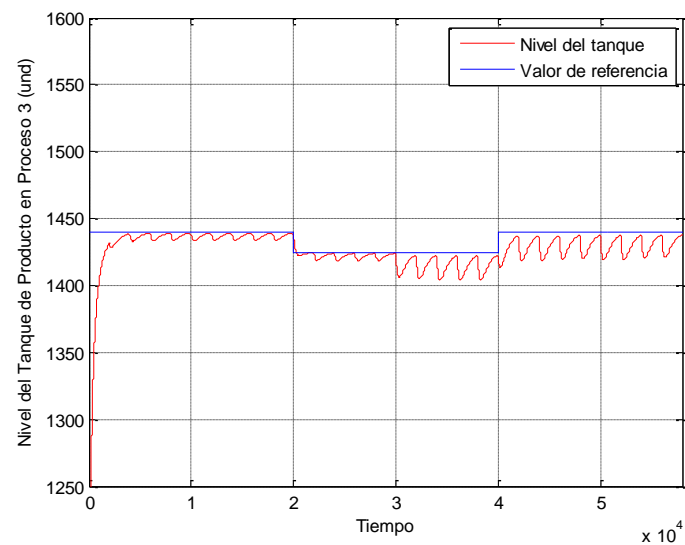


Ilustración 164 Variable PP 3 con PID en el proceso JS - D3 - P3.

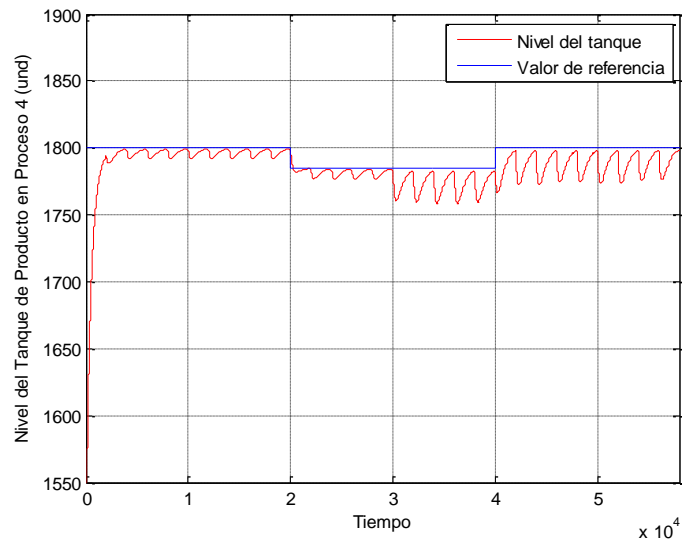


Ilustración 165 Variable PP 4 con PID en el proceso JS – D3 – P3.

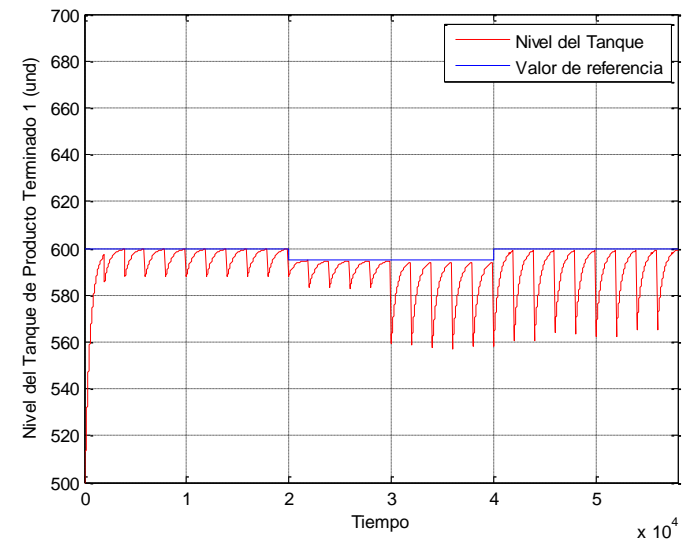


Ilustración 166 Variable PT 1 con PID en el proceso JS – D3 – P3.

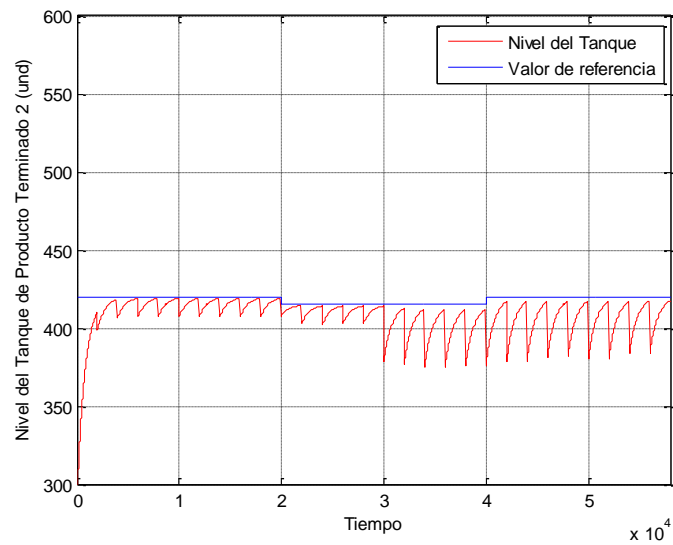


Ilustración 167 Variable PT 2 con PID en el proceso JS – D3 – P3.

ANEXO 13. IMPLEMENTACIÓN PID AL PROCESO FFS CON D1 – P1.

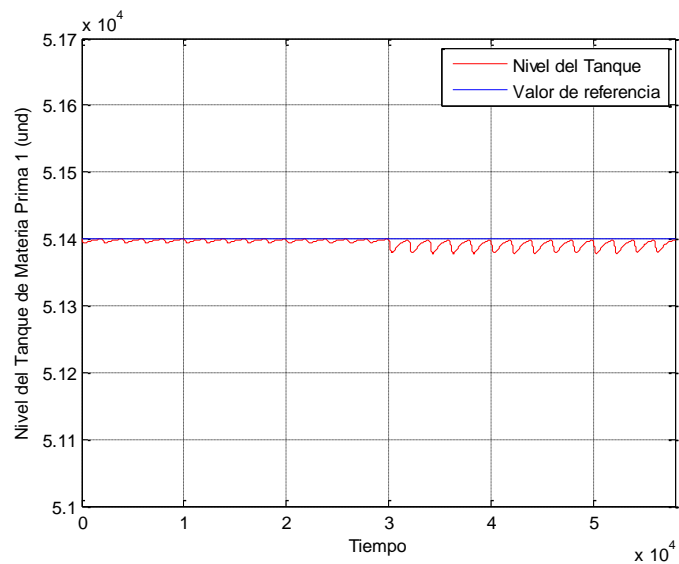


Ilustración 168 Variable MP 1 con PID en el proceso FFS – D1 – P1.

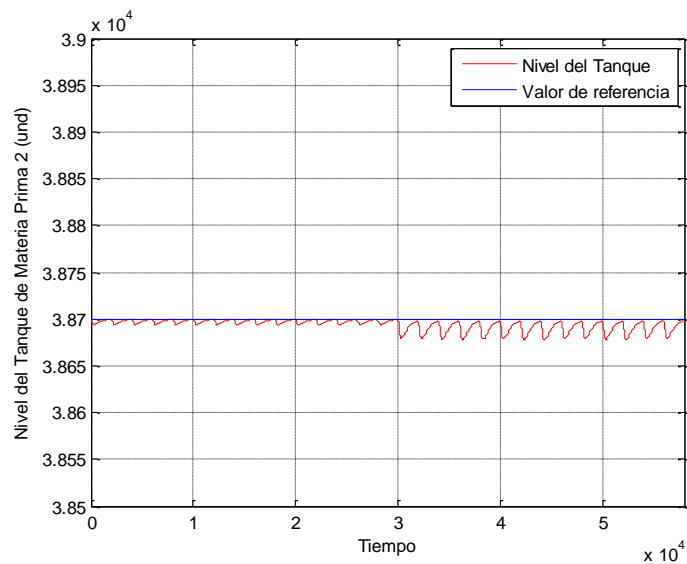


Ilustración 169 Variable MP 2 con PID en el proceso FFS – D1 – P1.

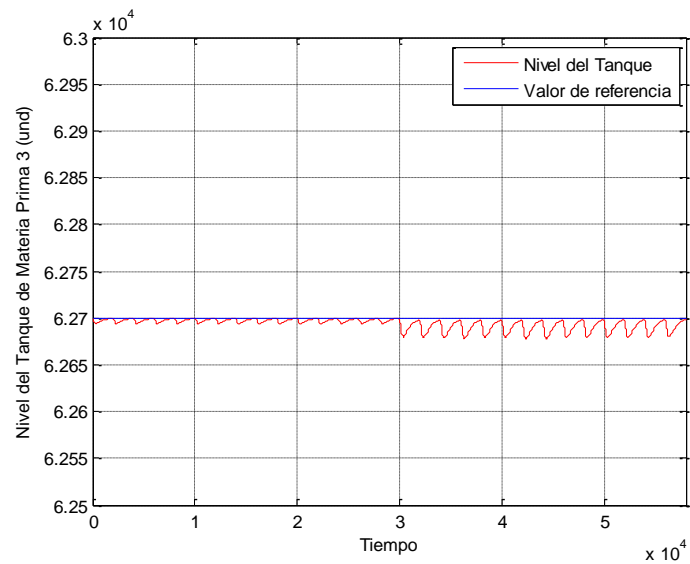


Ilustración 170 Variable MP 3 con PID en el proceso FFS – D1 – P1.

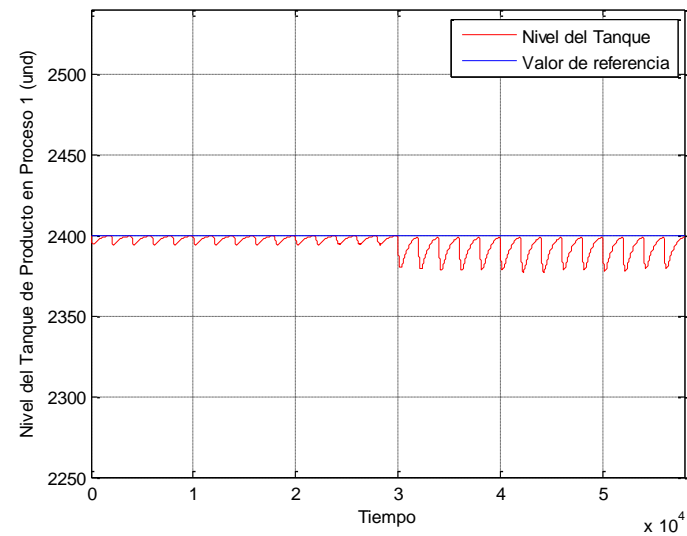


Ilustración 171 Variable PP 1 con PID en el proceso FFS – D1 – P1.

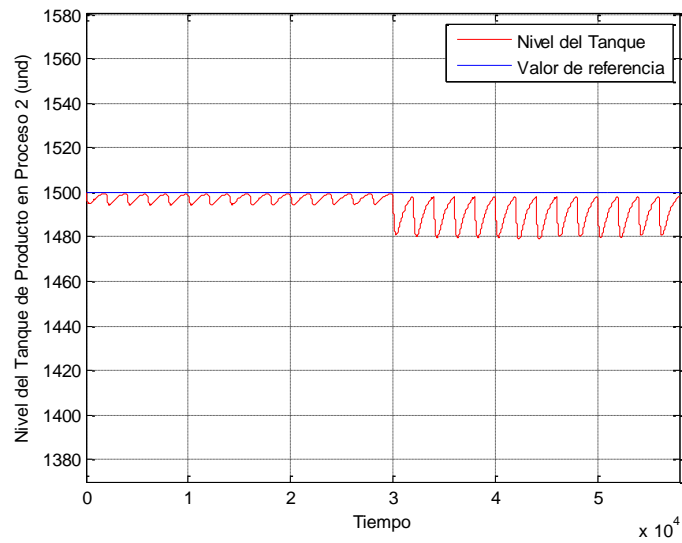


Ilustración 172 Variable PP 2 con PID en el proceso FFS – D1 – P1.

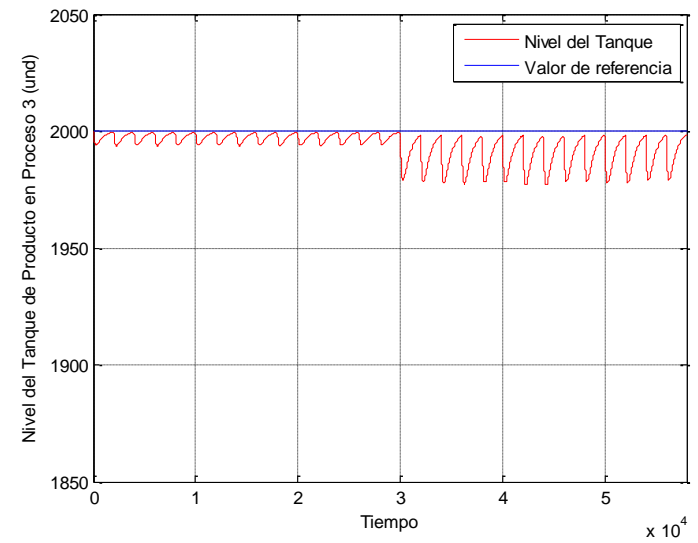


Ilustración 173 Variable PP 3 con PID en el proceso FFS – D1 – P1.

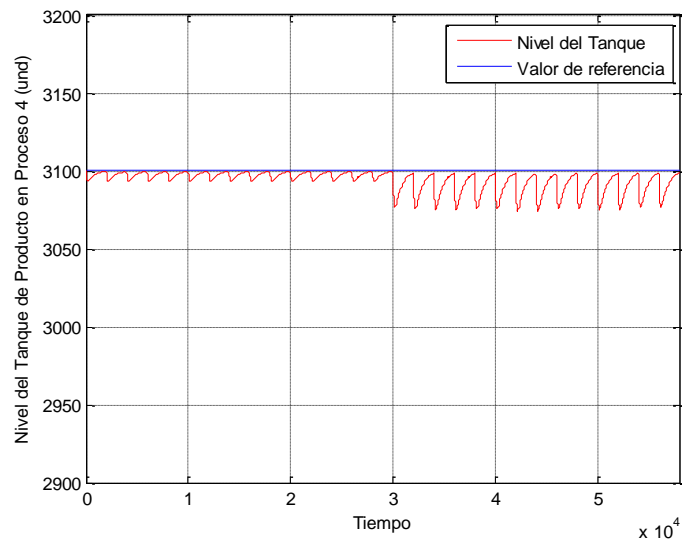


Ilustración 174 Variable PP 4 con PID en el proceso FFS – D1 – P1.

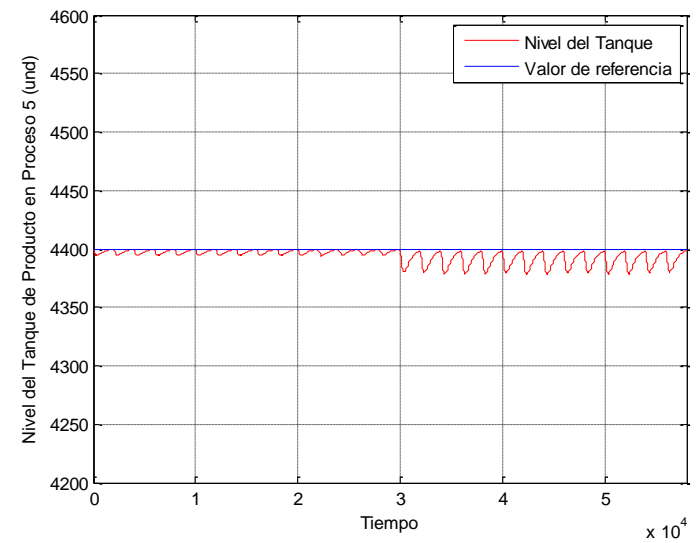


Ilustración 175 Variable PP 5 con PID en el proceso FFS – D1 – P1.

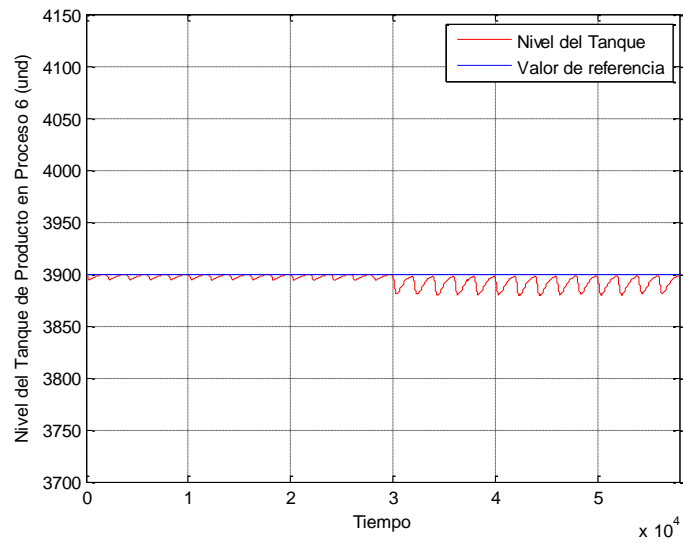


Ilustración 176 Variable PP 6 con PID en el proceso FFS – D1 – P1.

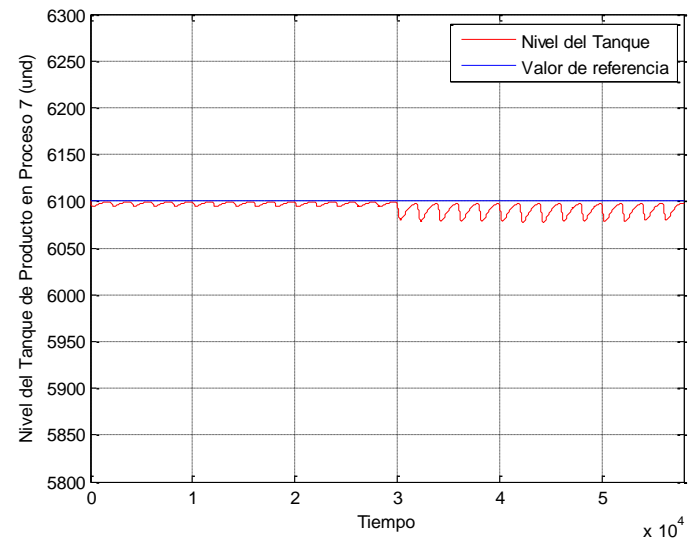


Ilustración 177 Variable PP 7 con PID en el proceso FFS – D1 – P1.

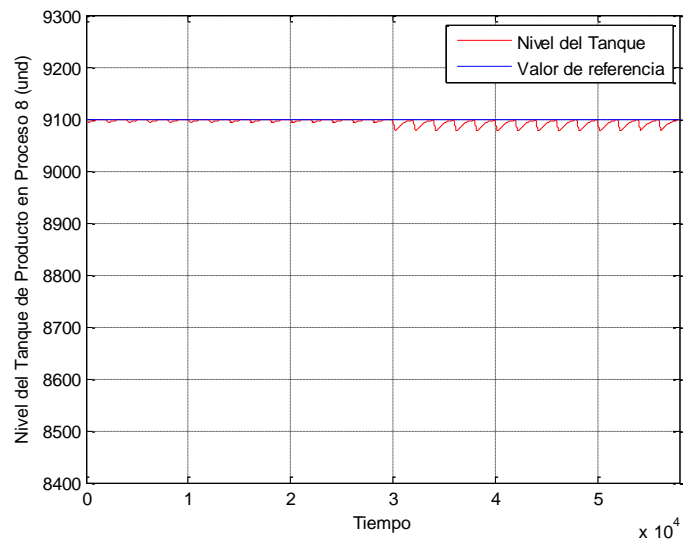


Ilustración 178 Variable PP 8 con PID en el proceso FFS – D1 – P1.

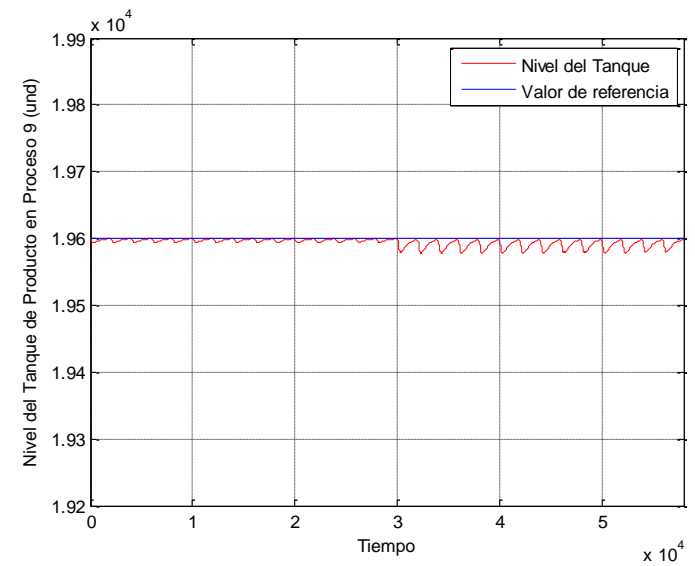


Ilustración 179 Variable PP 9 con PID en el proceso FFS – D1 – P1.

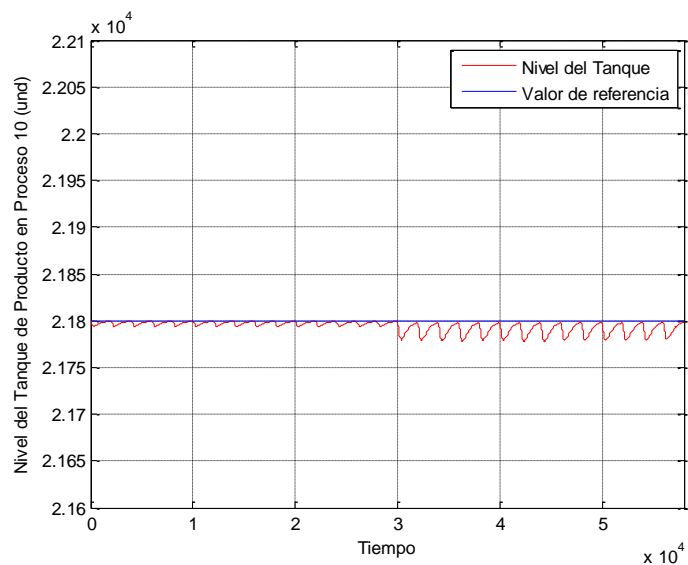


Ilustración 180 Variable PP 10 con PID en el proceso FFS – D1 – P1.

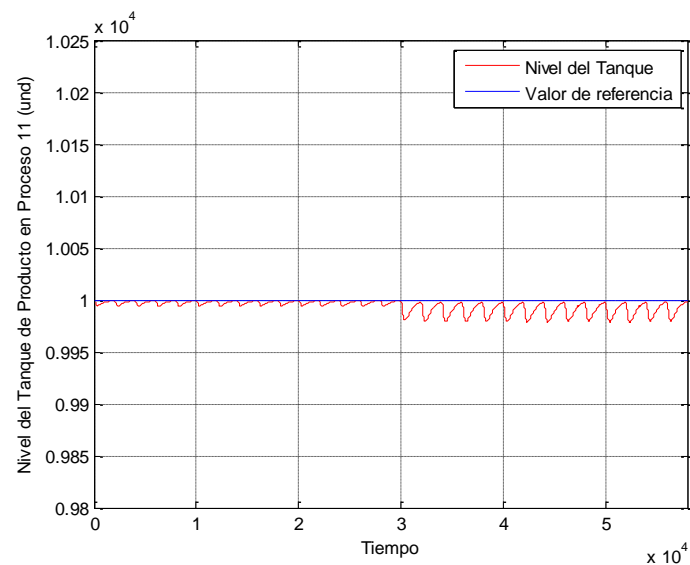


Ilustración 181 Variable PP 11 con PID en el proceso FFS – D1 – P1.

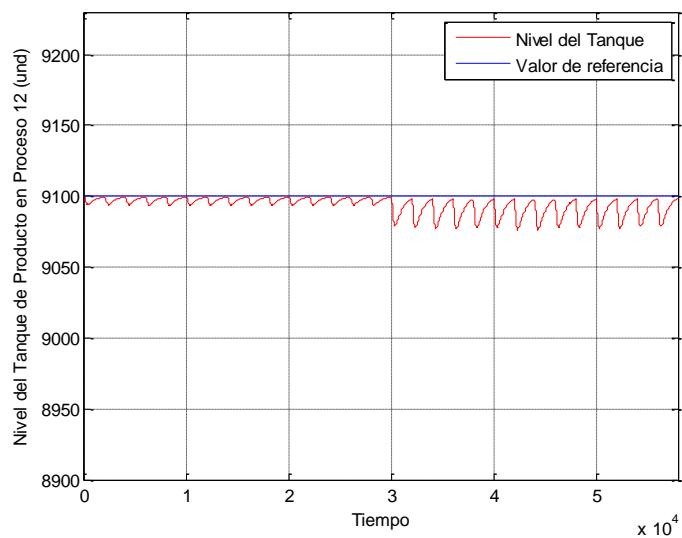


Ilustración 182 Variable PP 12 con PID en el proceso FFS – D1 – P1.

ANEXO 14. IMPLEMENTACIÓN PID AL PROCESO FFS CON D1 – P2.

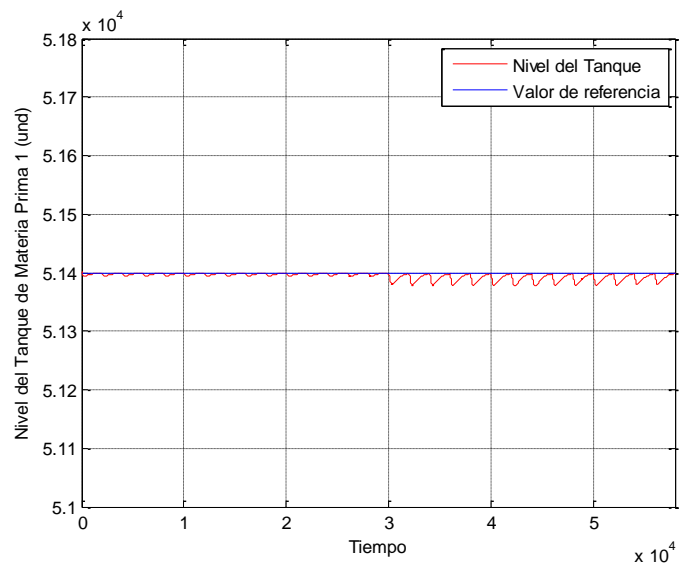


Ilustración 183 Variable MP 1 con PID en el proceso FFS – D1 – P2.

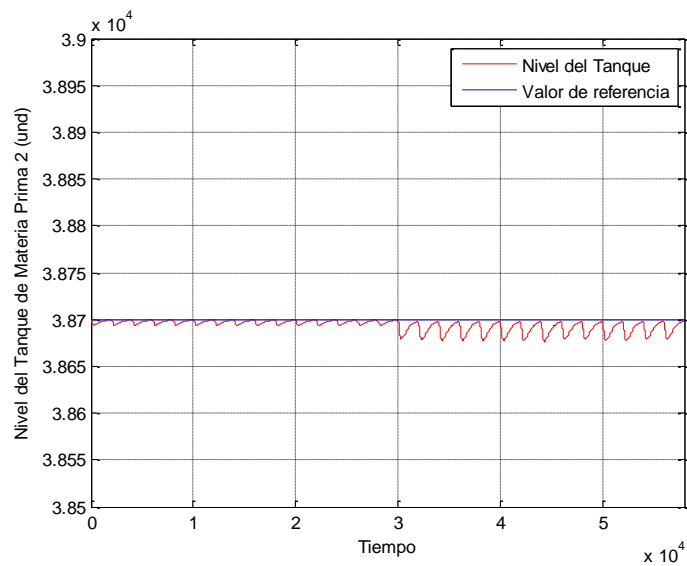


Ilustración 184 Variable MP 2 con PID en el proceso FFS – D1 – P2.

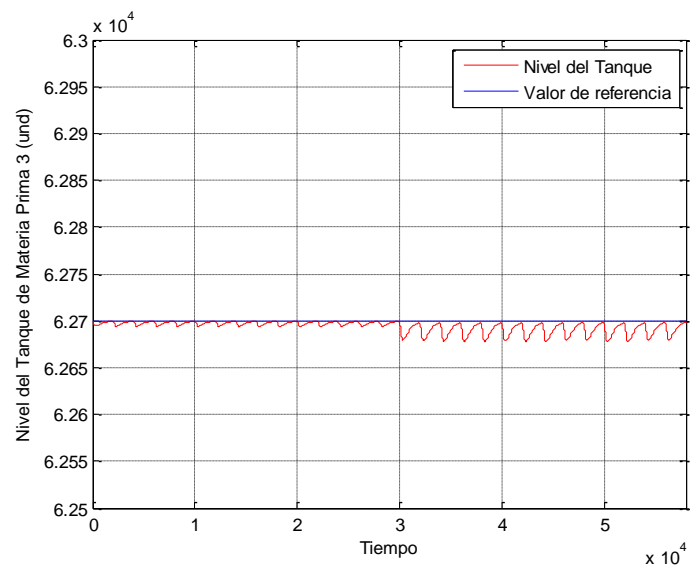


Ilustración 185 Variable MP 3 con PID en el proceso FFS – D1 – P2.

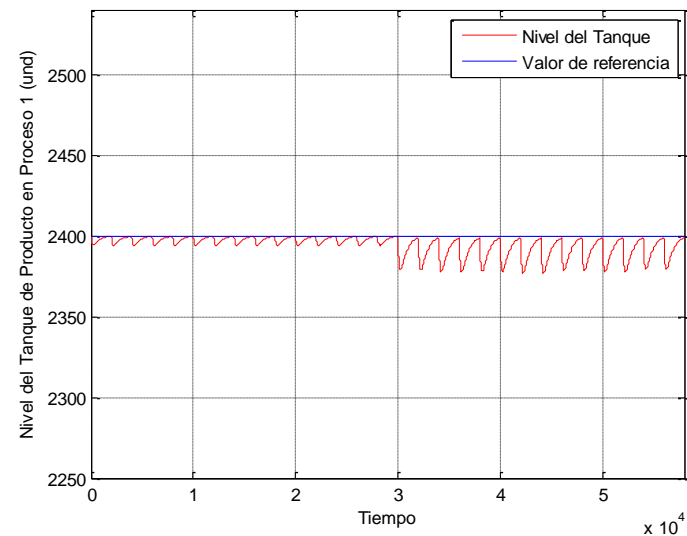


Ilustración 186 Variable PP 1 con PID en el proceso FFS – D1 – P2.



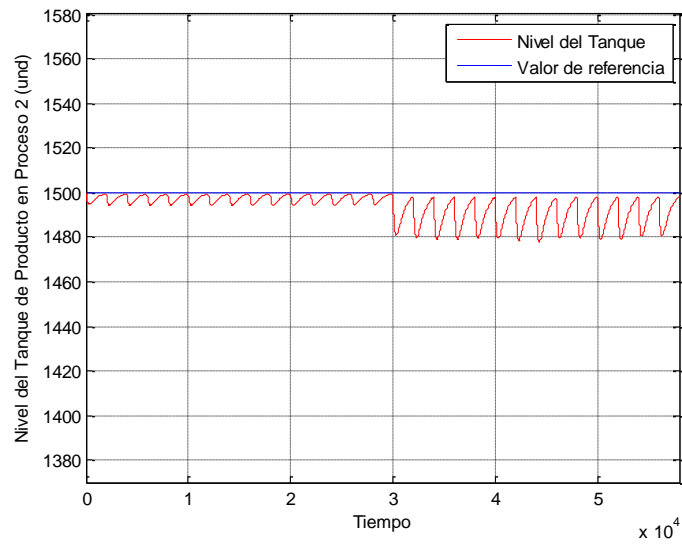


Ilustración 187 Variable PP 2 con PID en el proceso FFS – D1 – P2.

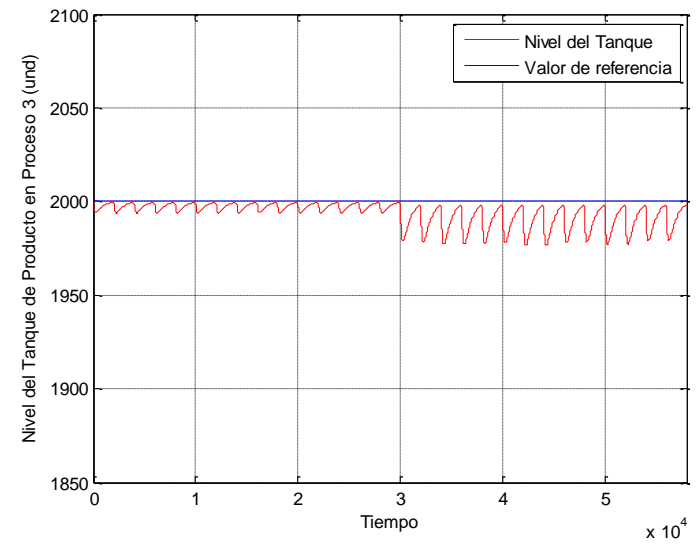


Ilustración 188 Variable PP 3 con PID en el proceso FFS – D1 – P2.

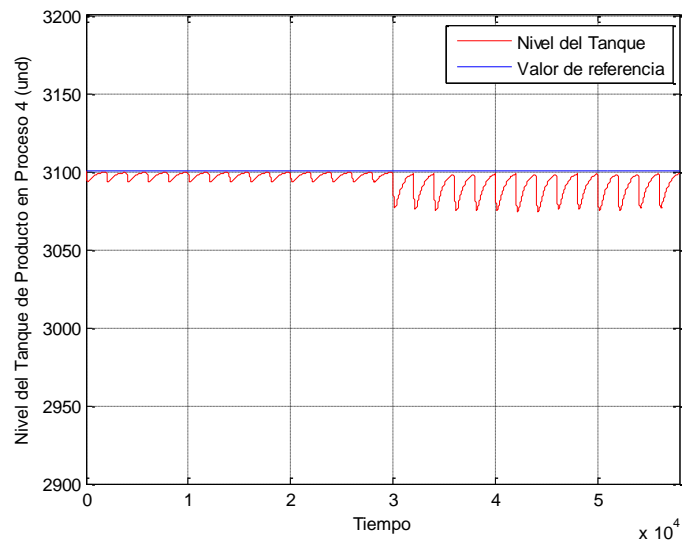


Ilustración 189 Variable PP 4 con PID en el proceso FFS – D1 – P2.

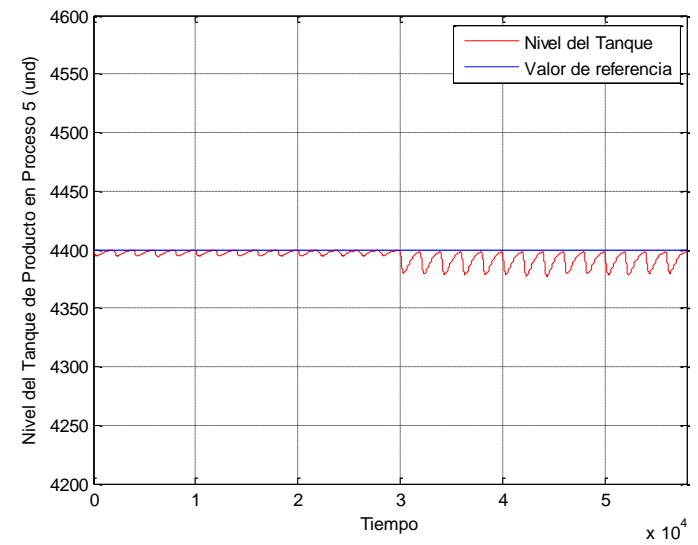


Ilustración 190 Variable PP 5 con PID en el proceso FFS – D1 – P2.

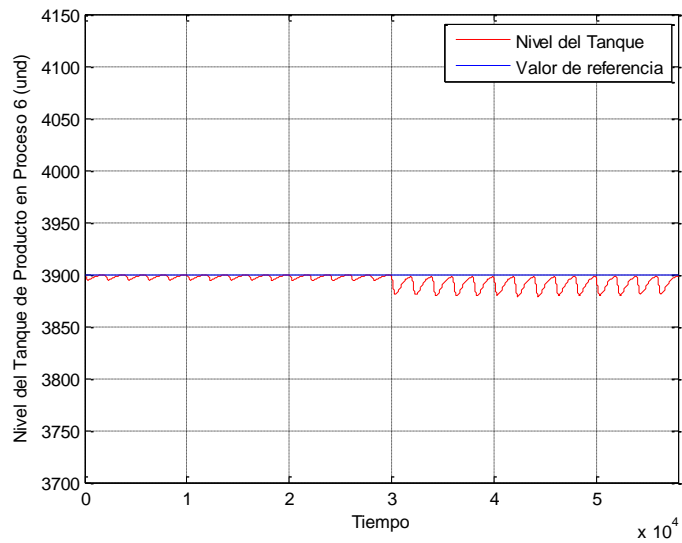


Ilustración 191 Variable PP 6 con PID en el proceso FFS – D1 – P2.

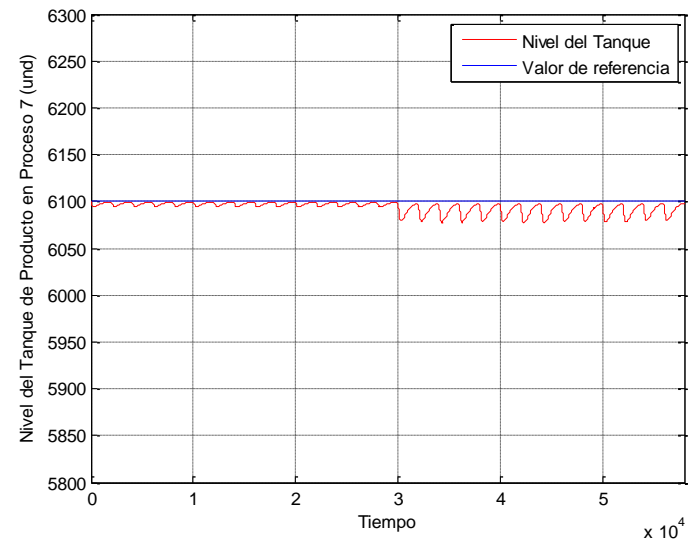


Ilustración 192 Variable PP 7 con PID en el proceso FFS – D1 – P2.

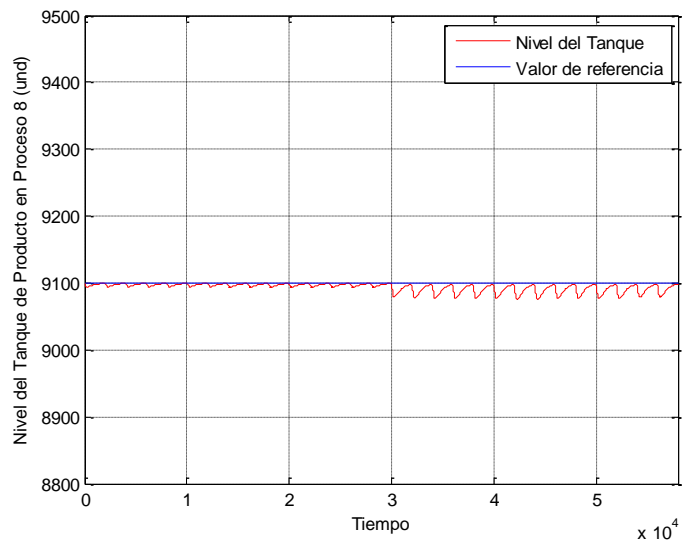


Ilustración 193 Variable PP 8 con PID en el proceso FFS – D1 – P2.

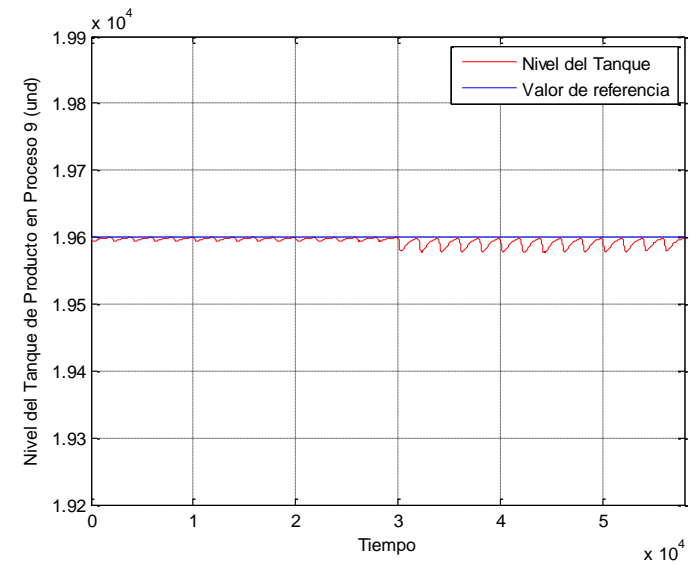


Ilustración 194 Variable PP 9 con PID en el proceso FFS – D1 – P2.

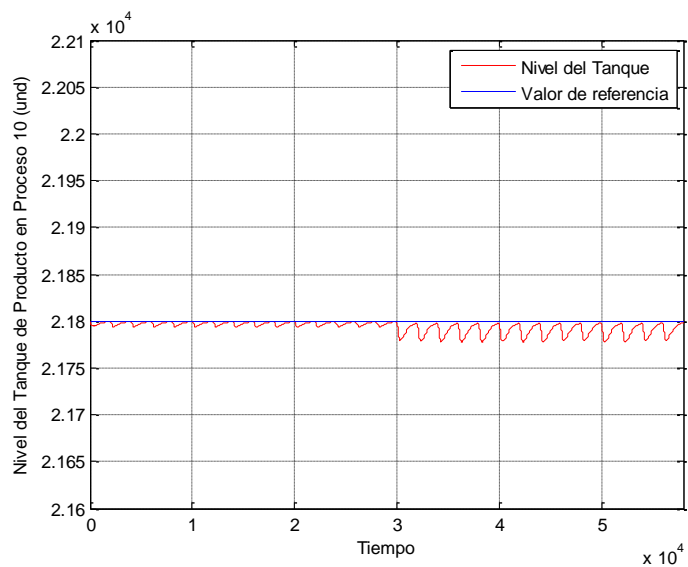


Ilustración 195 Variable PP 10 con PID en el proceso FFS – D1 – P2.

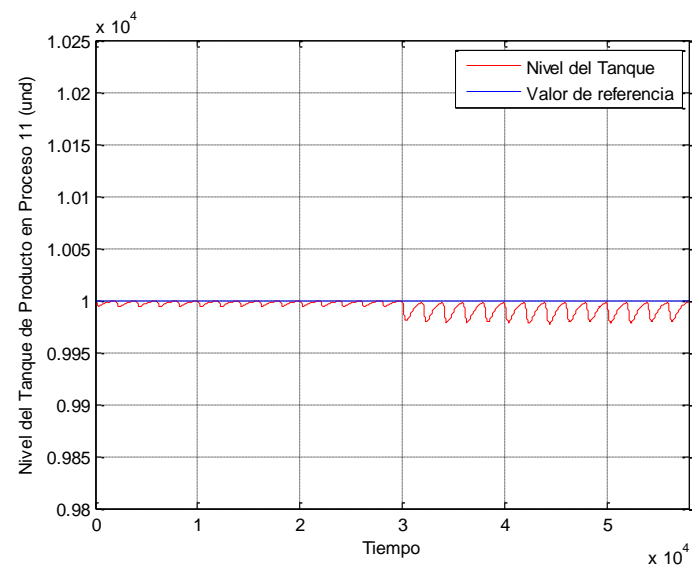


Ilustración 196 Variable PP 11 con PID en el proceso FFS – D1 – P2.

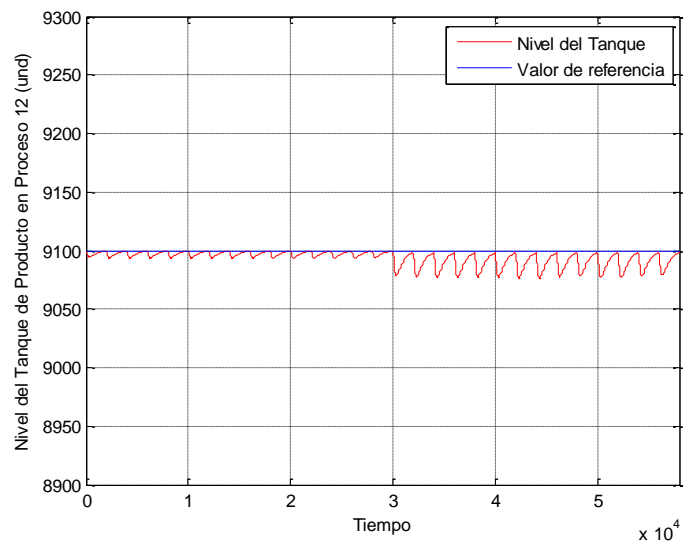


Ilustración 197 Variable PP 12 con PID en el proceso FFS – D1 – P2.

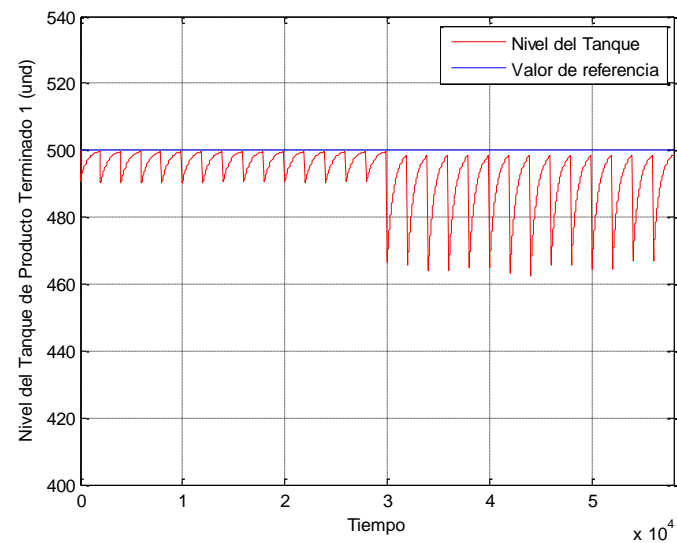


Ilustración 198 Variable PT 1 con PID en el proceso FFS – D1 – P2.

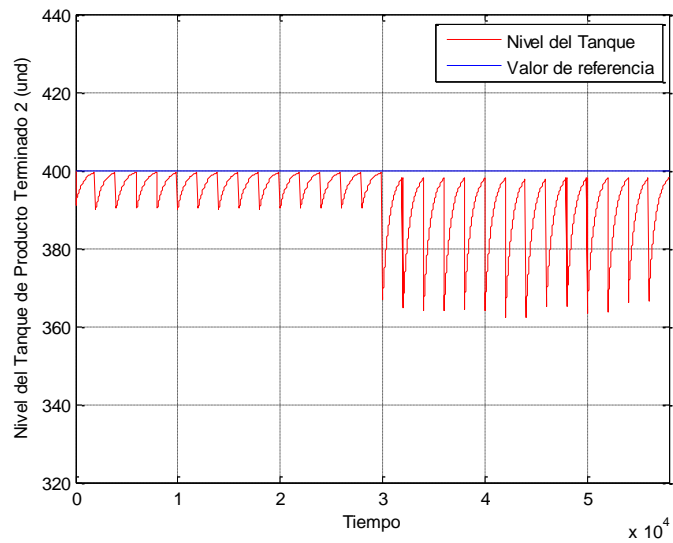


Ilustración 199 Variable PT 2 con PID en el proceso FFS – D1 – P2.

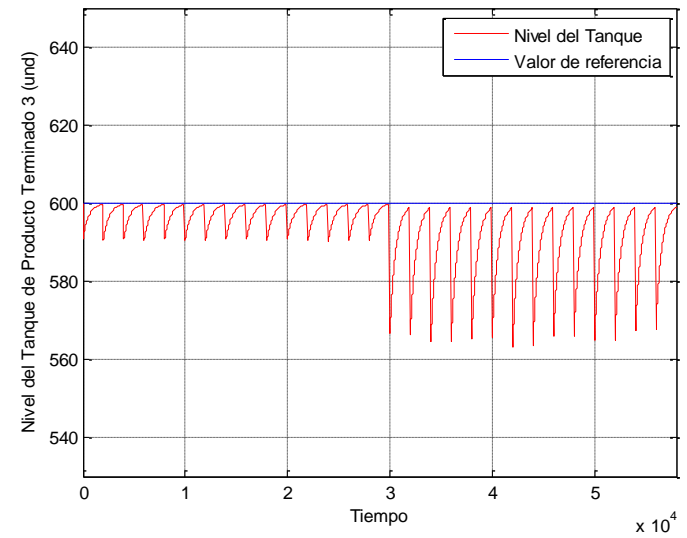


Ilustración 200 Variable PT 3 con PID en el proceso FFS – D1 – P2.

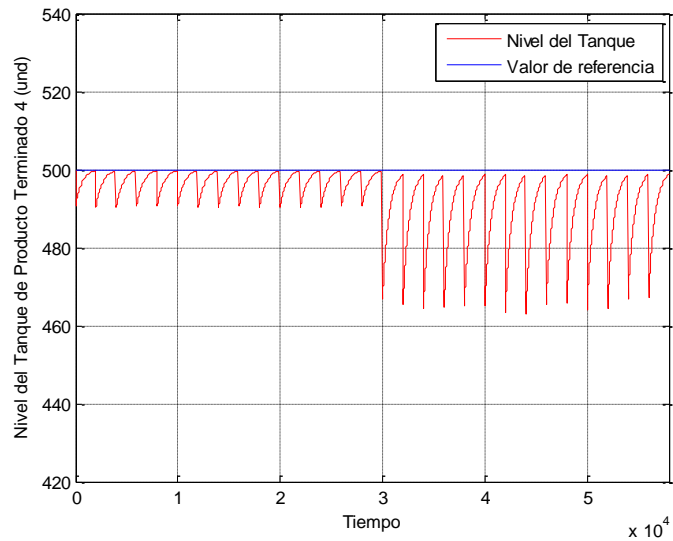


Ilustración 201 Variable PT 4 con PID en el proceso FFS – D1 – P2.

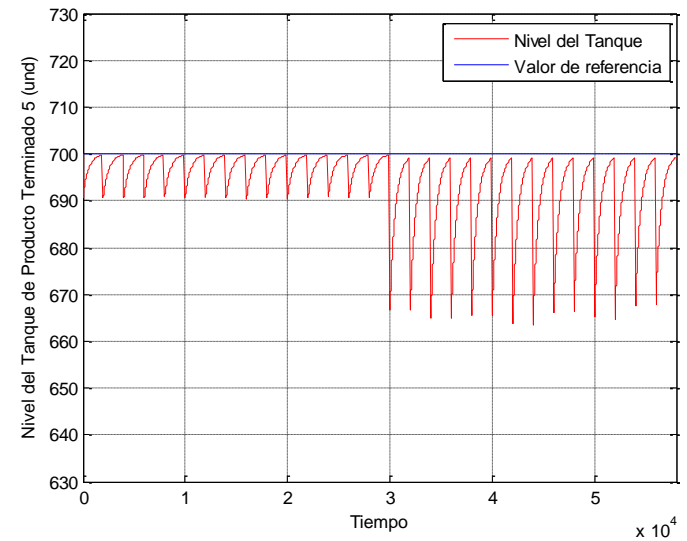


Ilustración 202 Variable PT 5 con PID en el proceso FFS – D1 – P2.

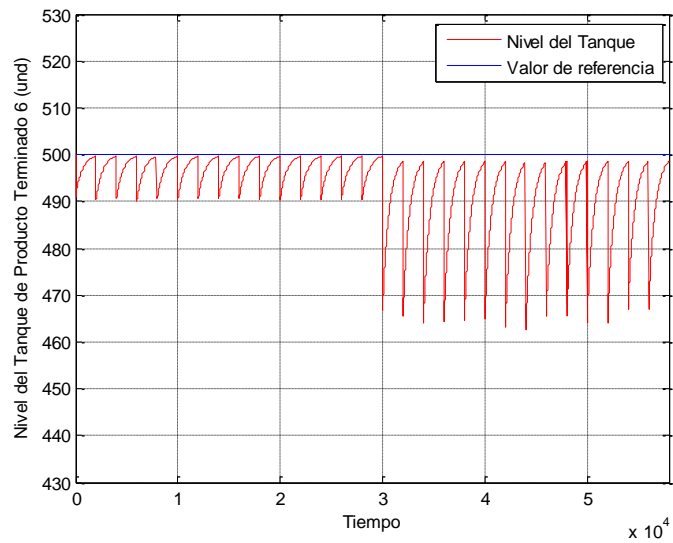


Ilustración 203 Variable PT 6 con PID en el proceso FFS – D1 – P2.

#### ANEXO 15. IMPLEMENTACIÓN PID AL PROCESO FFS CON D1 – P3.

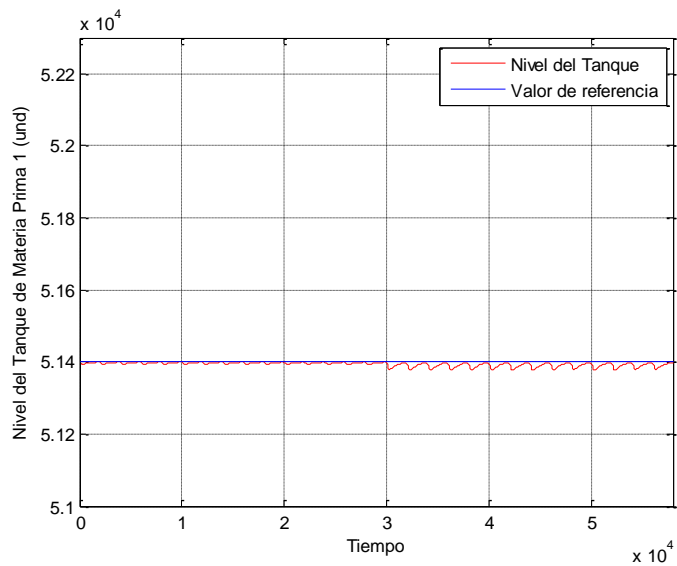


Ilustración 204 Variable MP 1 con PID en el proceso FFS – D1 – P3.

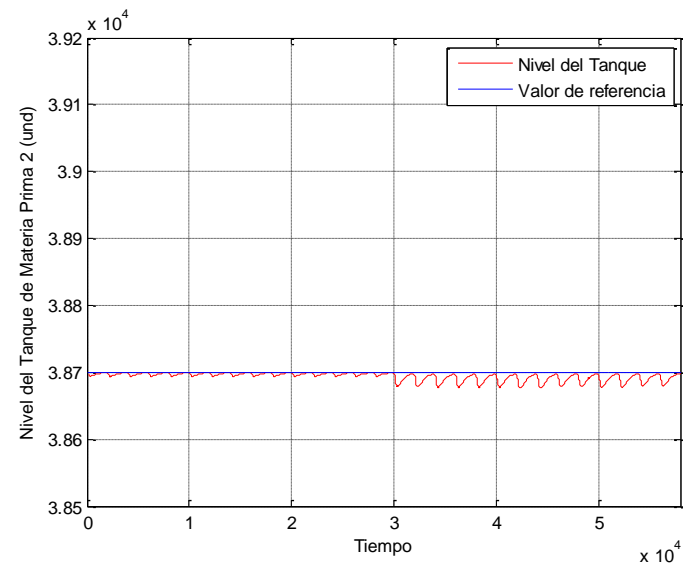


Ilustración 205 Variable MP 2 con PID en el proceso FFS – D1 – P3.

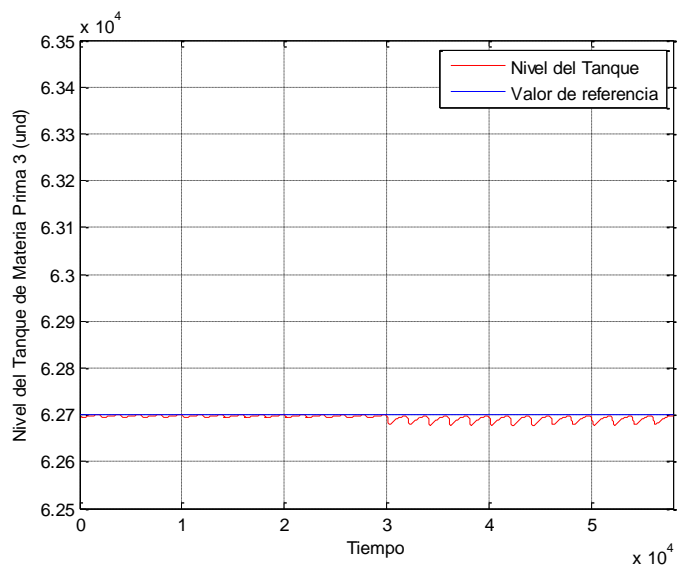


Ilustración 206 Variable MP 3 con PID en el proceso FFS – D1 – P3.

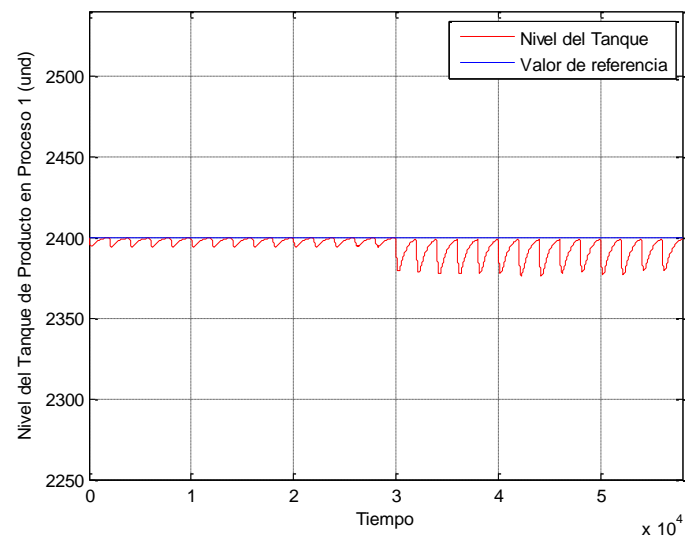


Ilustración 207 Variable PP 1 con PID en el proceso FFS – D1 – P3.

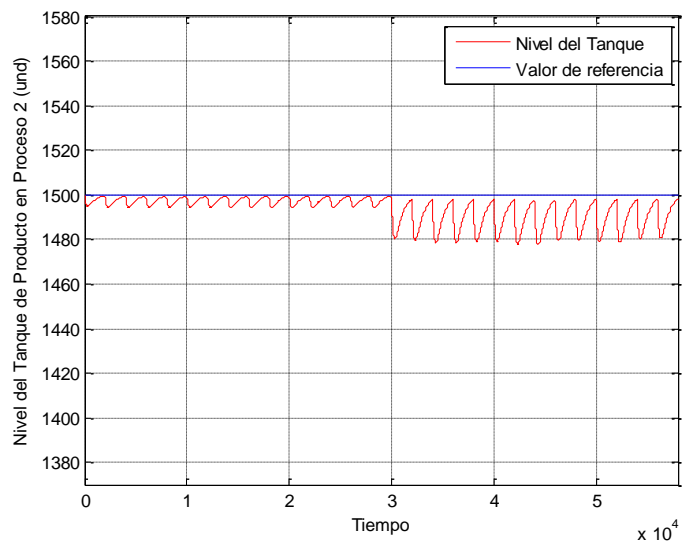


Ilustración 208 Variable PP 2 con PID en el proceso FFS – D1 – P3.

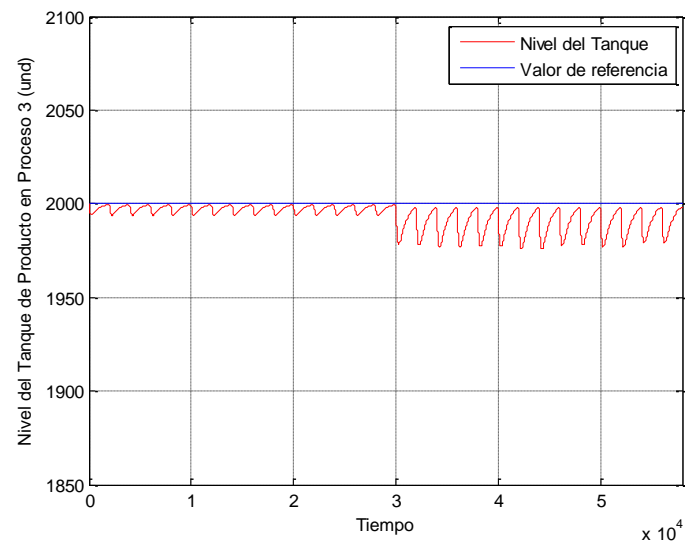


Ilustración 209 Variable PP 3 con PID en el proceso FFS – D1 – P3.

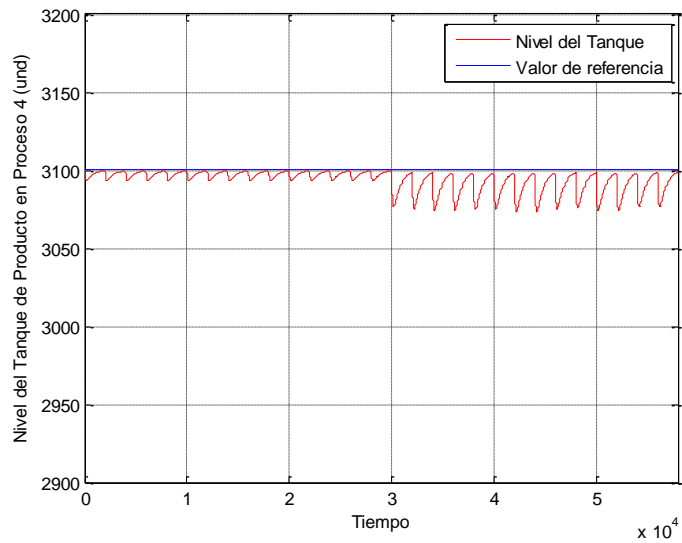


Ilustración 210 Variable PP 4 con PID en el proceso FFS – D1 – P3.

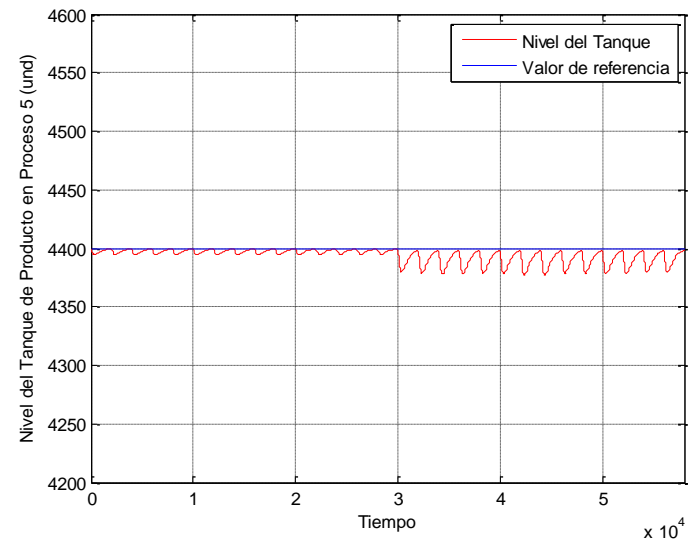


Ilustración 211 Variable PP 5 con PID en el proceso FFS – D1 – P3.

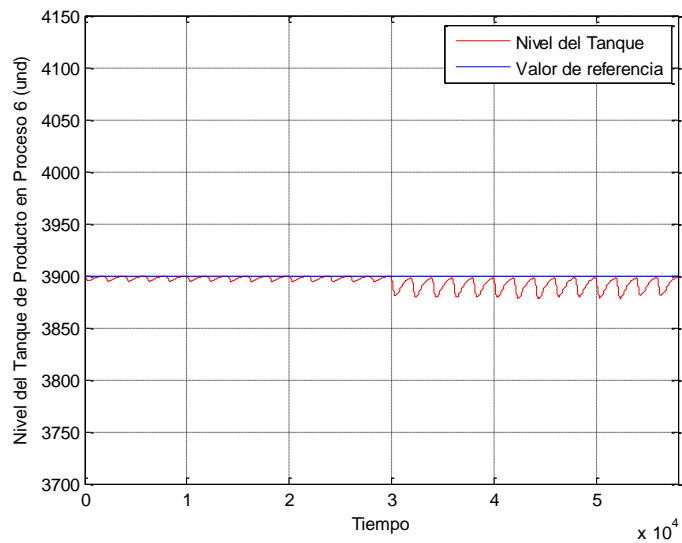


Ilustración 212 Variable PP 6 con PID en el proceso FFS – D1 – P3.

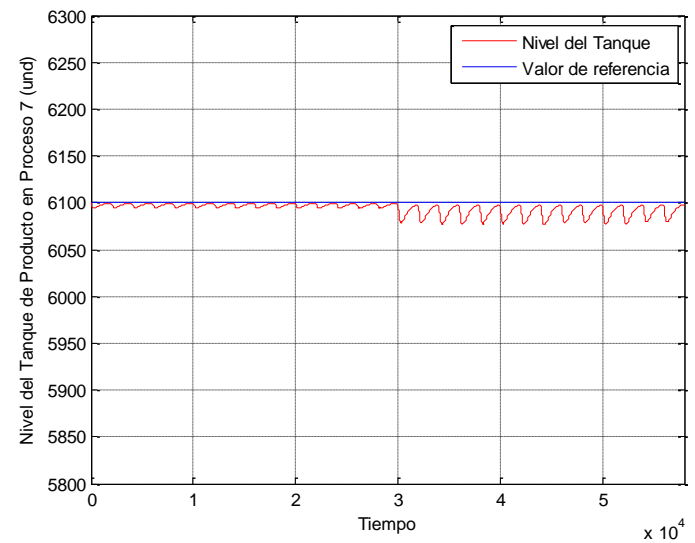


Ilustración 213 Variable PP 7 con PID en el proceso FFS – D1 – P3.

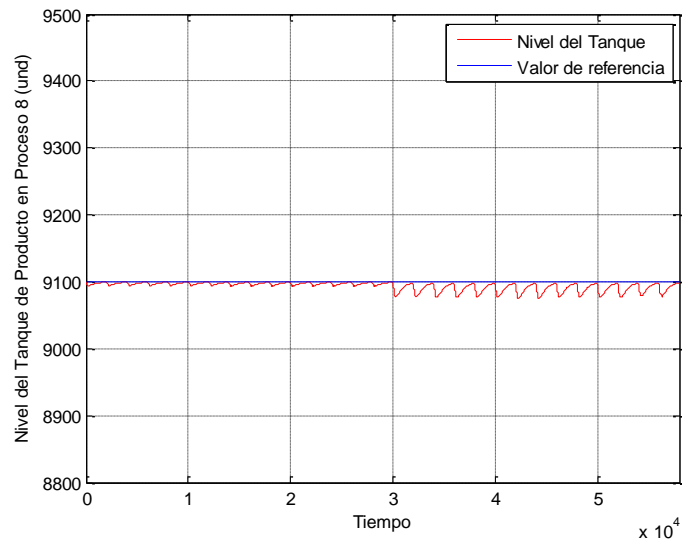


Ilustración 214 Variable PP 8 con PID en el proceso FFS – D1 – P3.

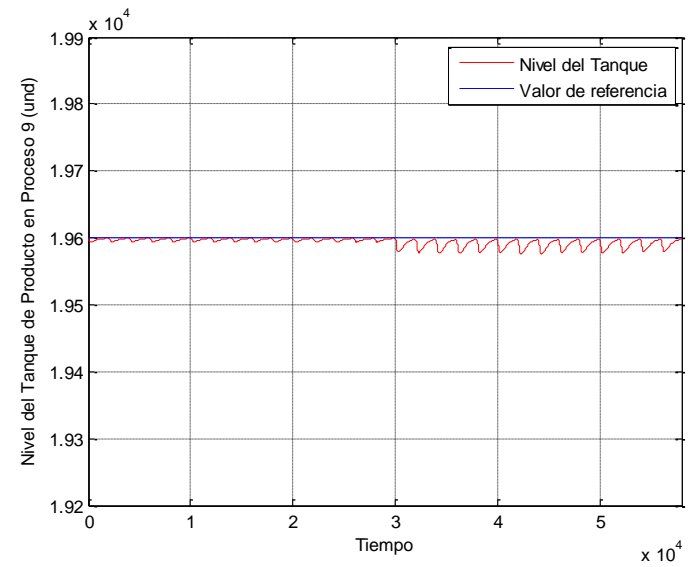


Ilustración 215 Variable PP 9 con PID en el proceso FFS – D1 – P3.

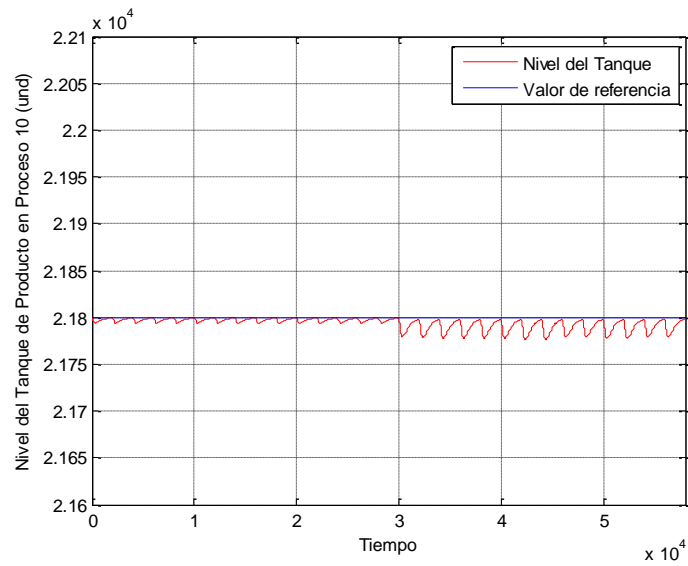


Ilustración 216 Variable PP 10 con PID en el proceso FFS – D1 – P3.

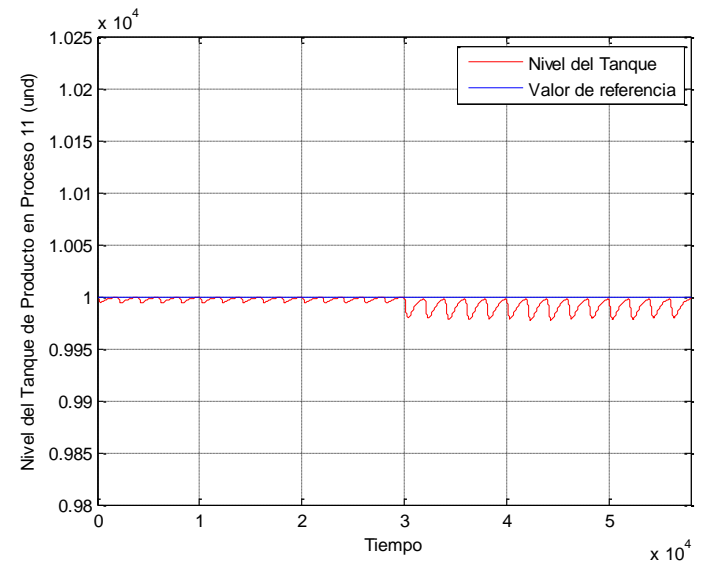


Ilustración 217 Variable PP 11 con PID en el proceso FFS – D1 – P3.



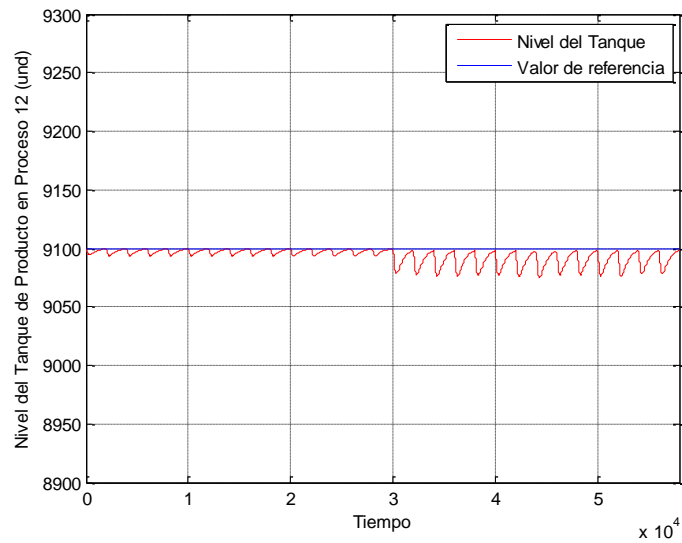


Ilustración 218 Variable PP 12 con PID en el proceso FFS – D1 – P3.

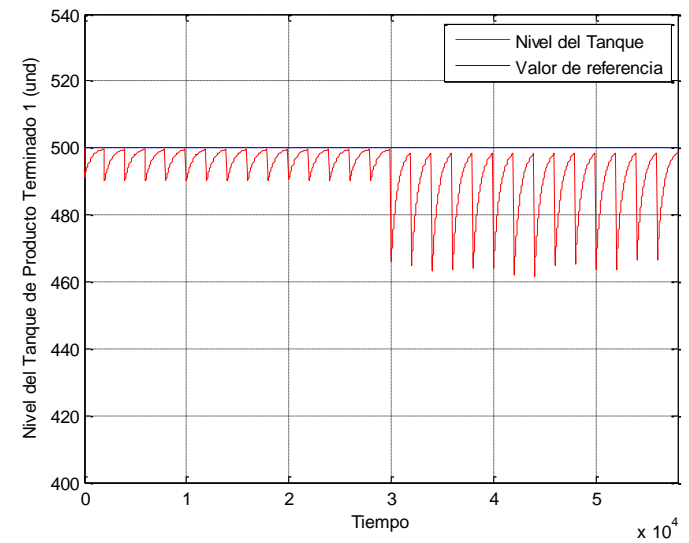


Ilustración 219 Variable PT 1 con PID en el proceso FFS – D1 – P3.

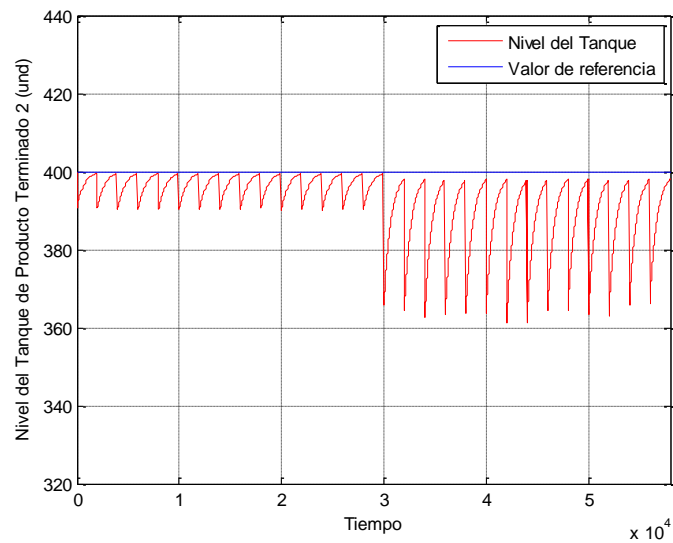


Ilustración 220 Variable PT 2 con PID en el proceso FFS – D1 – P3.

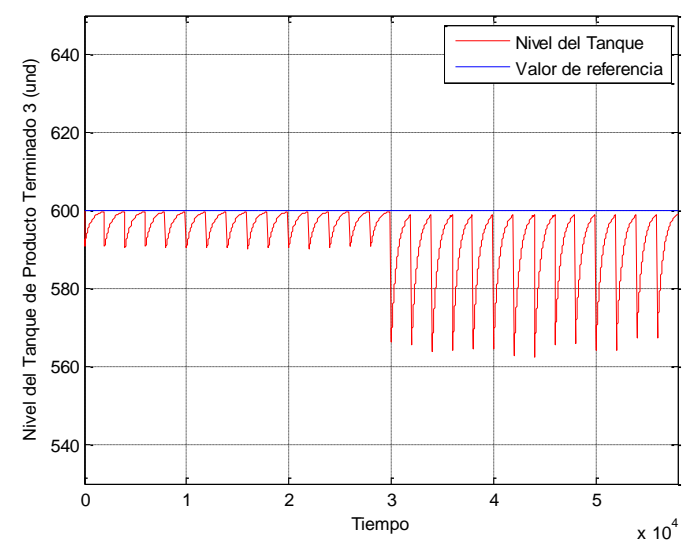


Ilustración 221 Variable PT 3 con PID en el proceso FFS – D1 – P3.

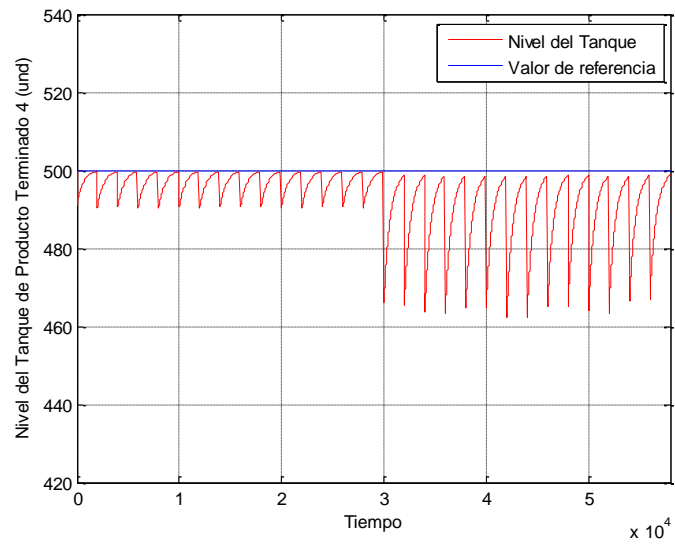


Ilustración 222 Variable PT 4 con PID en el proceso FFS – D1 – P3.

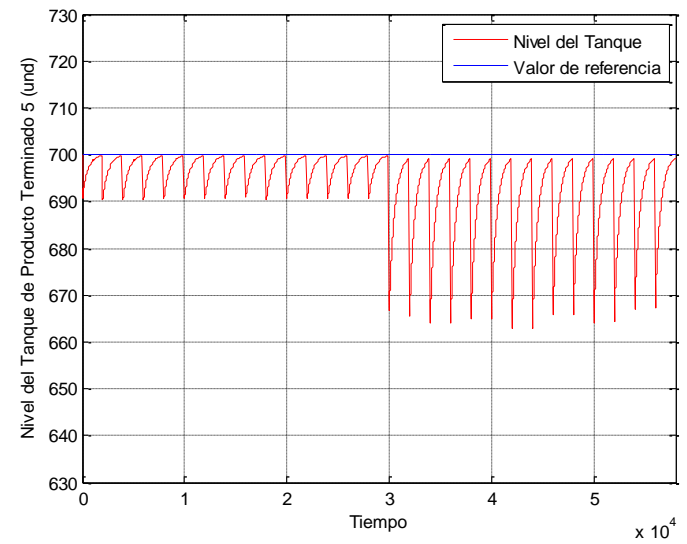


Ilustración 223 Variable PT 5 con PID en el proceso FFS – D1 – P3.

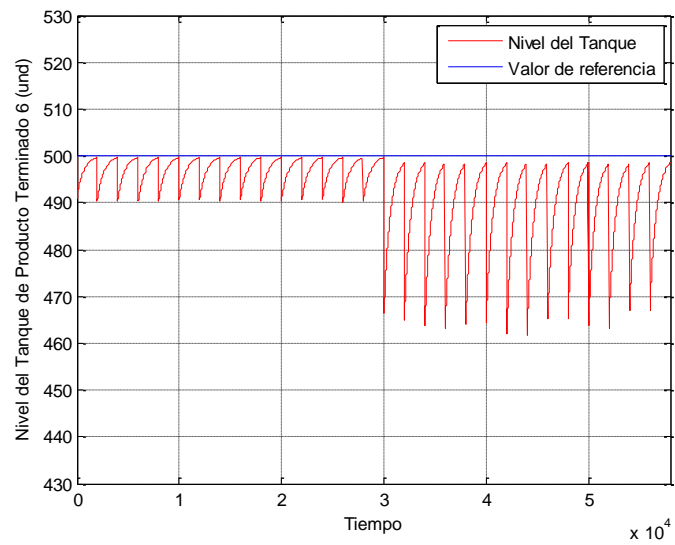


Ilustración 224 Variable PT 6 con PID en el proceso FFS – D1 – P3.

ANEXO 16. IMPLEMENTACIÓN PID AL PROCESO FFS CON D2 – P1.

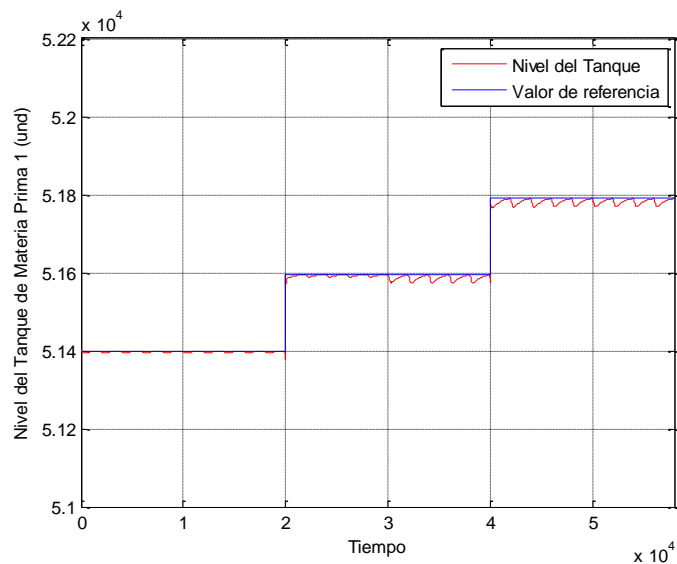


Ilustración 225 Variable MP 1 con PID en el proceso FFS – D2 – P1.

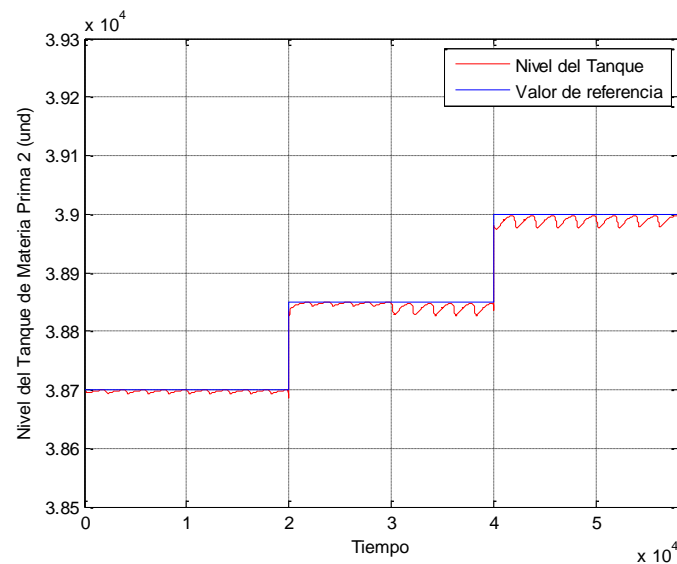


Ilustración 226 Variable MP 2 con PID en el proceso FFS – D2 – P1.

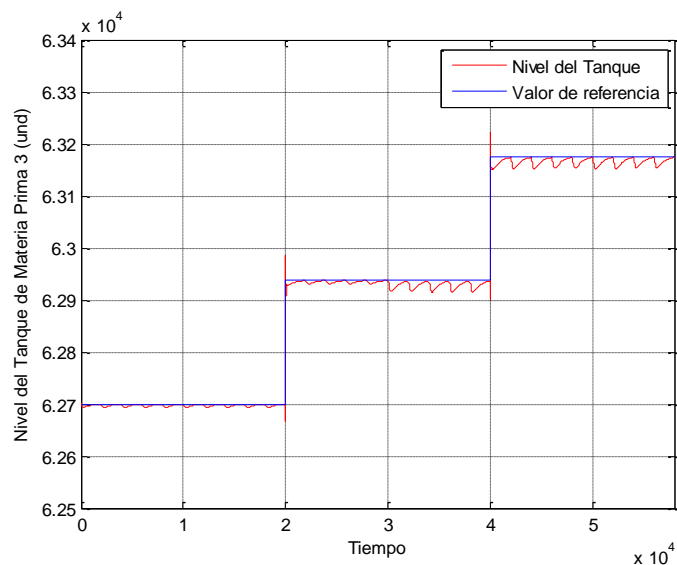


Ilustración 227 Variable MP 3 con PID en el proceso FFS – D2 – P1.

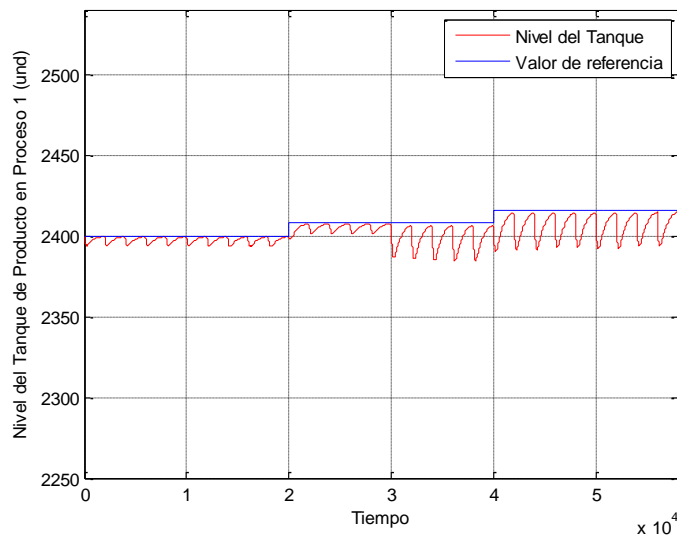


Ilustración 228 Variable PP 1 con PID en el proceso FFS – D2 – P1.

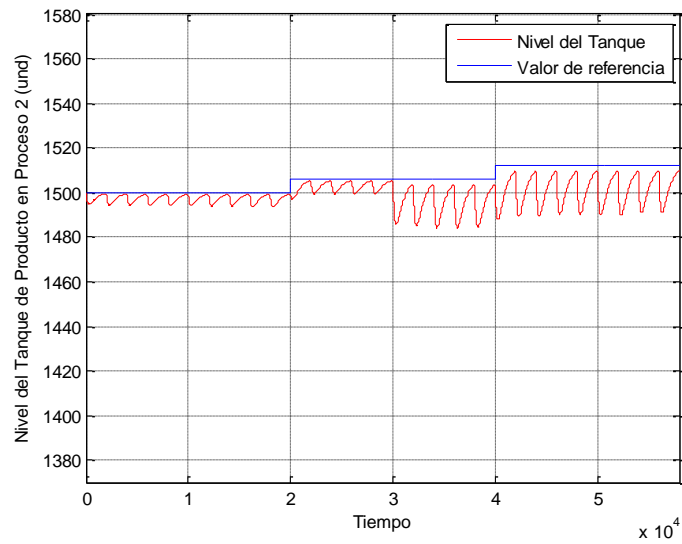


Ilustración 229 Variable PP 2 con PID en el proceso FFS – D2 – P1.

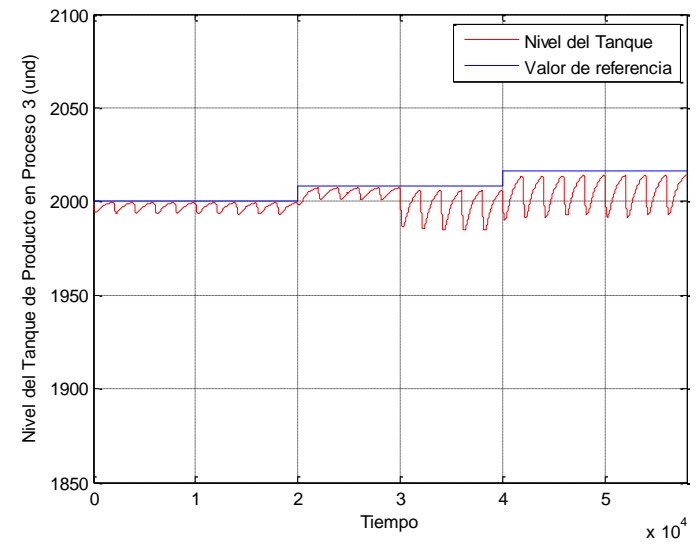


Ilustración 230 Variable PP 3 con PID en el proceso FFS – D2 – P1.

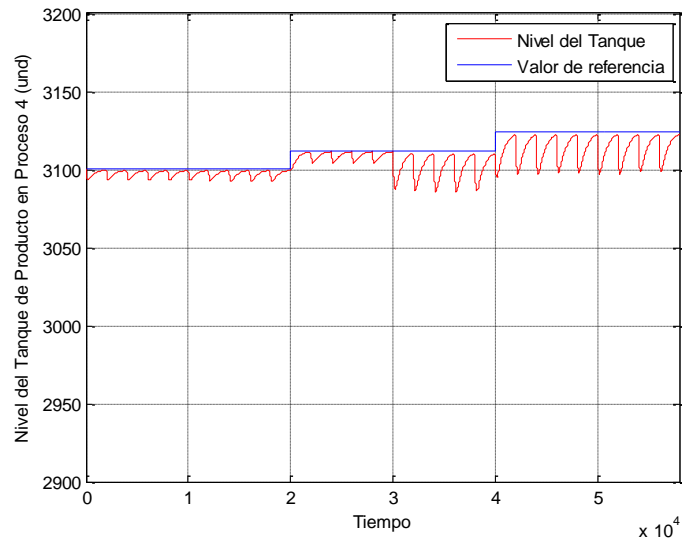


Ilustración 231 Variable PP 4 con PID en el proceso FFS – D2 – P1.

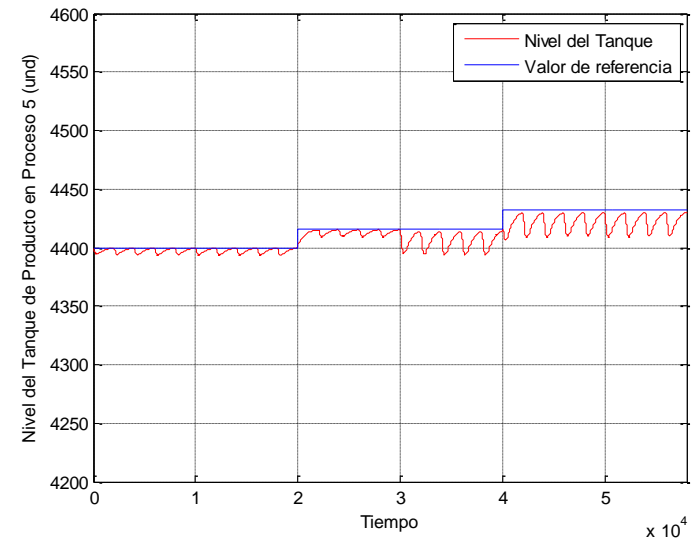


Ilustración 232 Variable PP 5 con PID en el proceso FFS – D2 – P1.

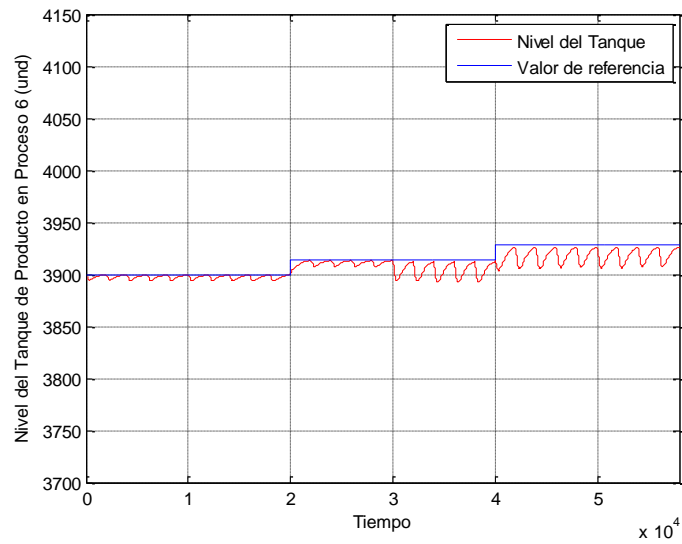


Ilustración 233 Variable PP 6 con PID en el proceso FFS – D2 – P1.

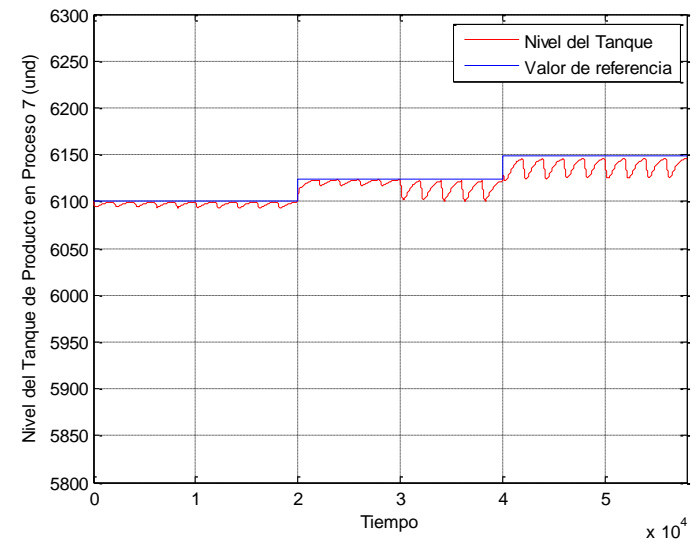


Ilustración 234 Variable PP 7 con PID en el proceso FFS – D2 – P1.

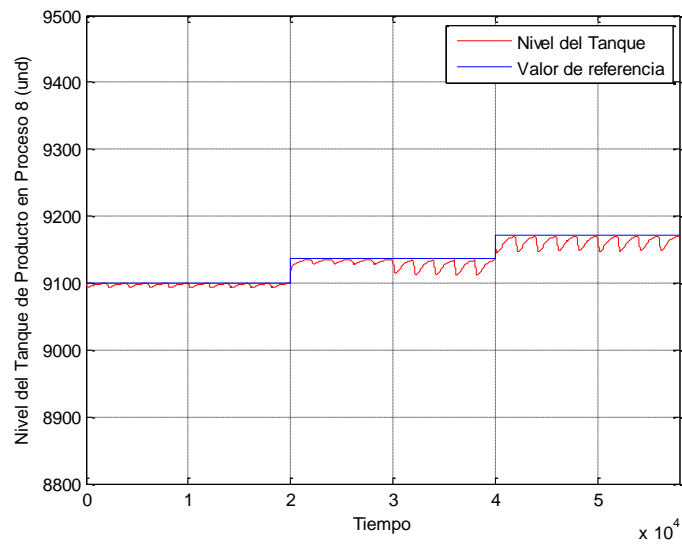


Ilustración 235 Variable PP 8 con PID en el proceso FFS – D2 – P1.

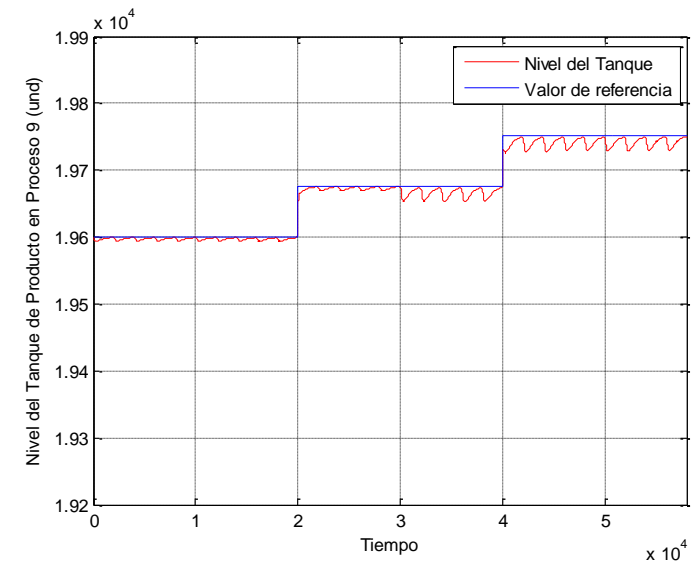


Ilustración 236 Variable PP 9 con PID en el proceso FFS – D2 – P1.

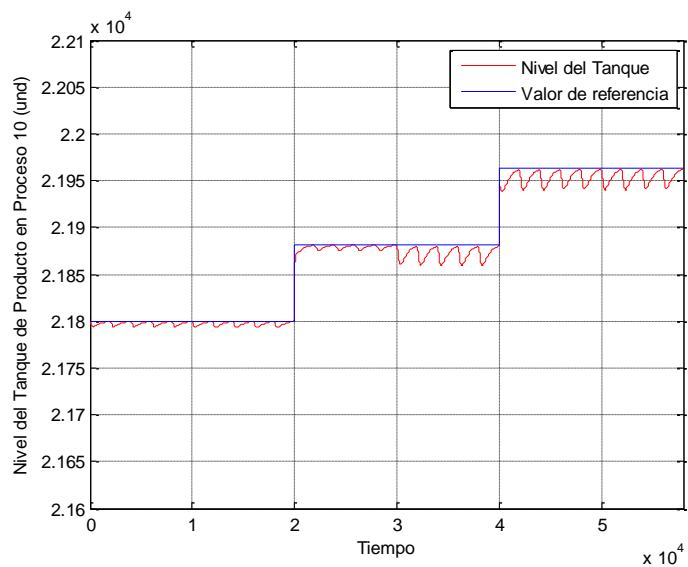


Ilustración 237 Variable PP 10 con PID en el proceso FFS – D2 – P1.

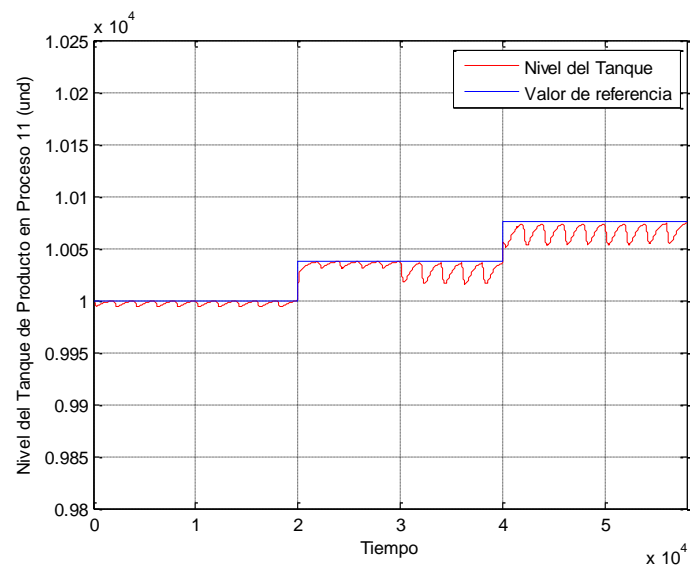


Ilustración 238 Variable PP 11 con PID en el proceso FFS – D2 – P1.

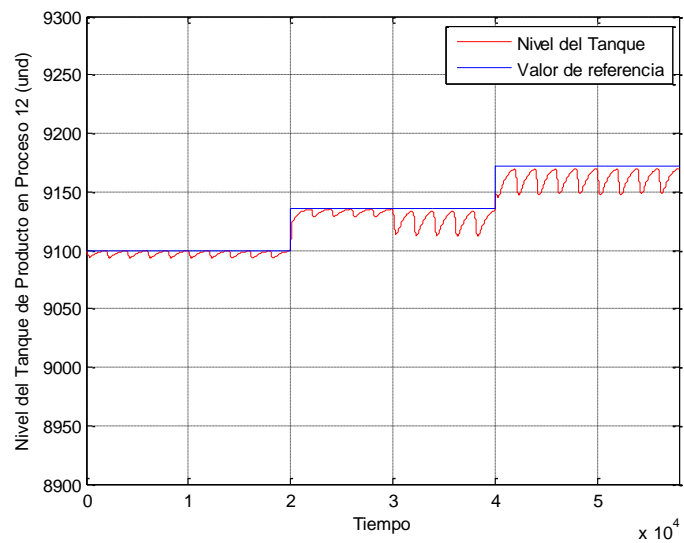


Ilustración 239 Variable PP 12 con PID en el proceso FFS – D2 – P1.

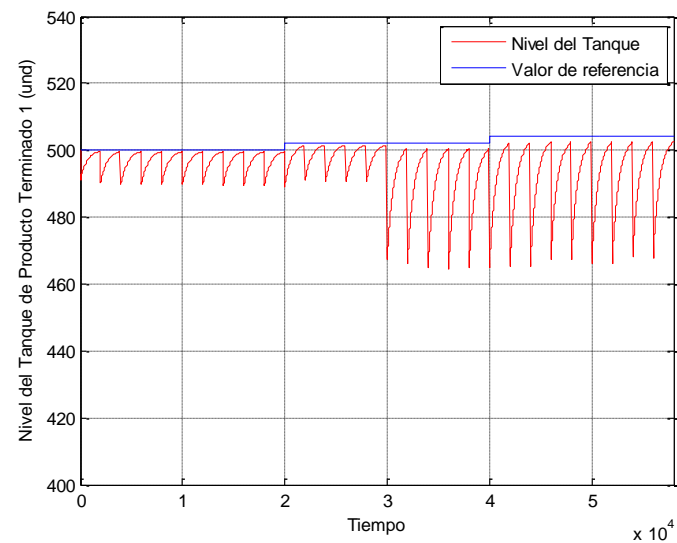


Ilustración 240 Variable PT 1 con PID en el proceso FFS – D2 – P1.

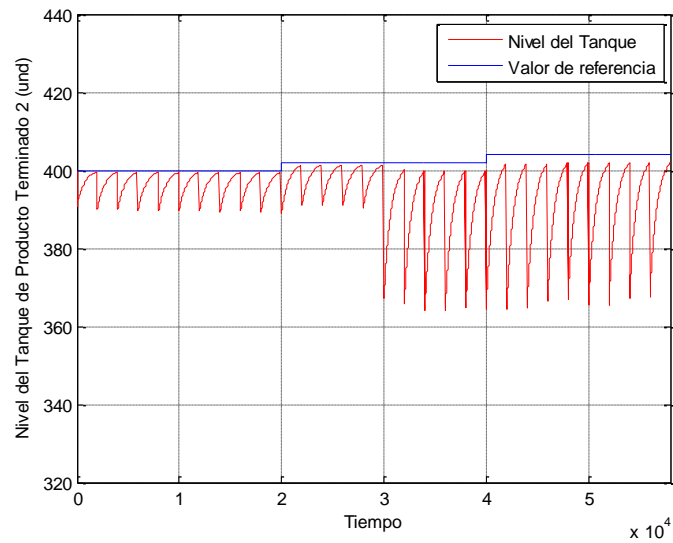


Ilustración 241 Variable PT 2 con PID en el proceso FFS – D2 – P1.

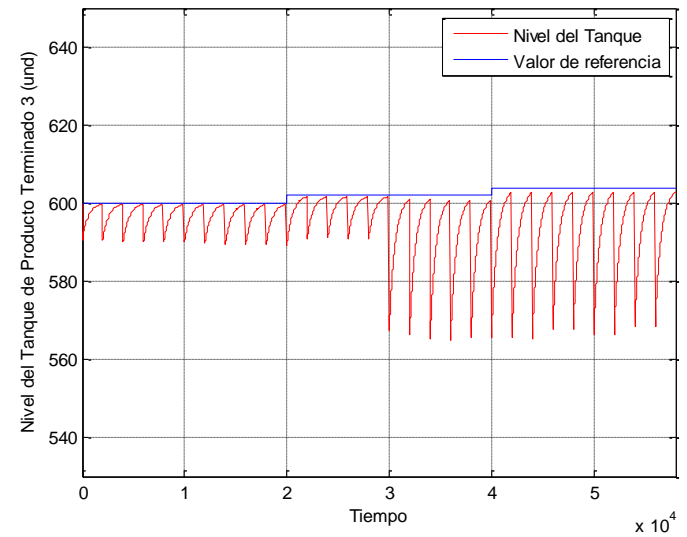


Ilustración 242 Variable PT 3 con PID en el proceso FFS – D2 – P1.

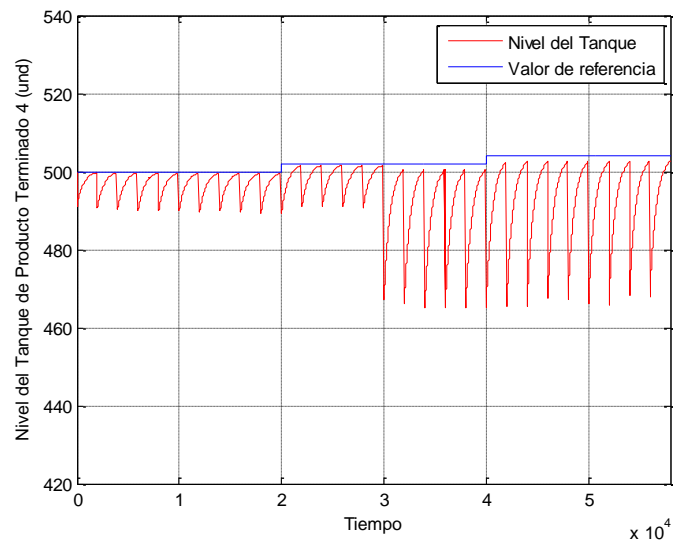


Ilustración 243 Variable PT 4 con PID en el proceso FFS – D2 – P1.

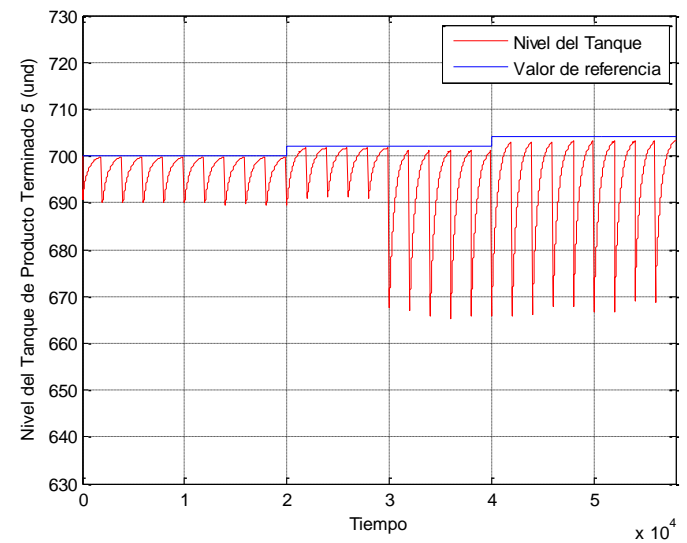


Ilustración 244 Variable PT 5 con PID en el proceso FFS – D2 – P1.

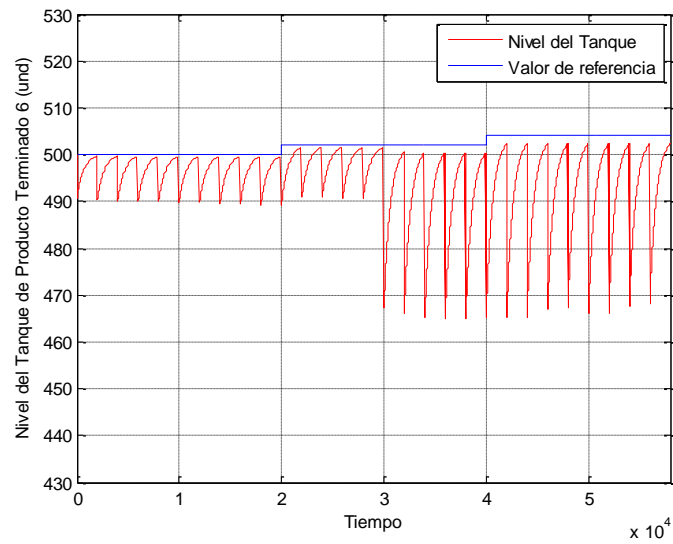


Ilustración 245 Variable PT 6 con PID en el proceso FFS – D2 – P1.

#### ANEXO 17. IMPLEMENTACIÓN PID AL PROCESO FFS CON D2 – P2.

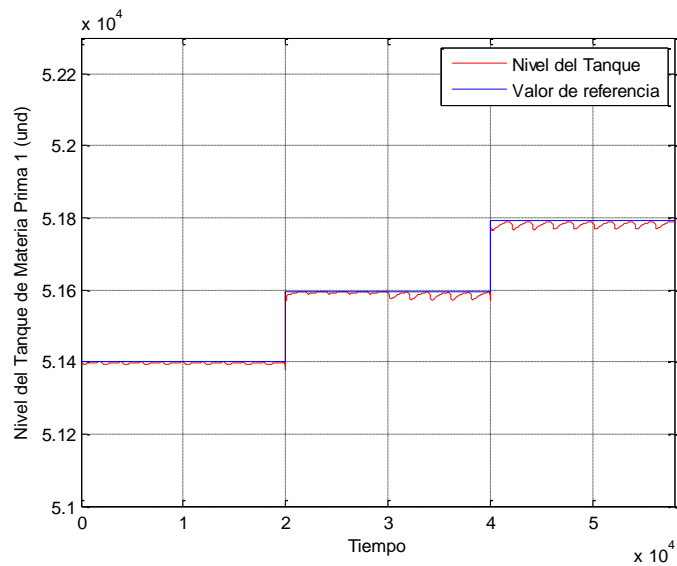


Ilustración 246 Variable MP 1 con PID en el proceso FFS – D2 – P2.

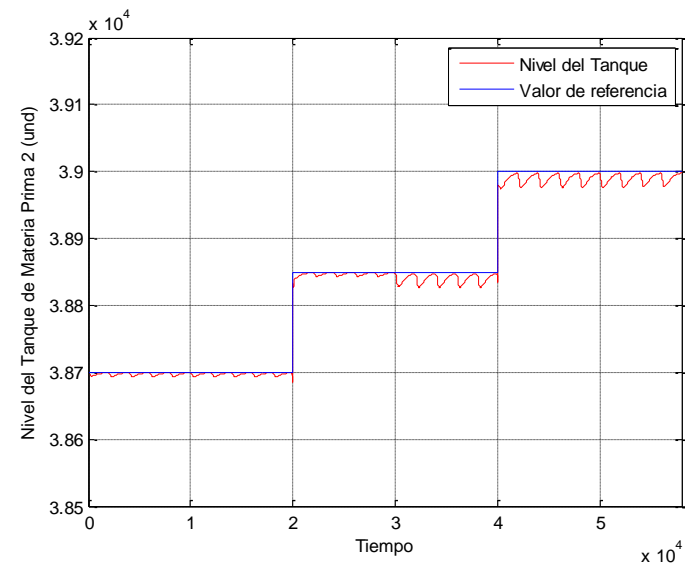


Ilustración 247 Variable MP 2 con PID en el proceso FFS – D2 – P2.



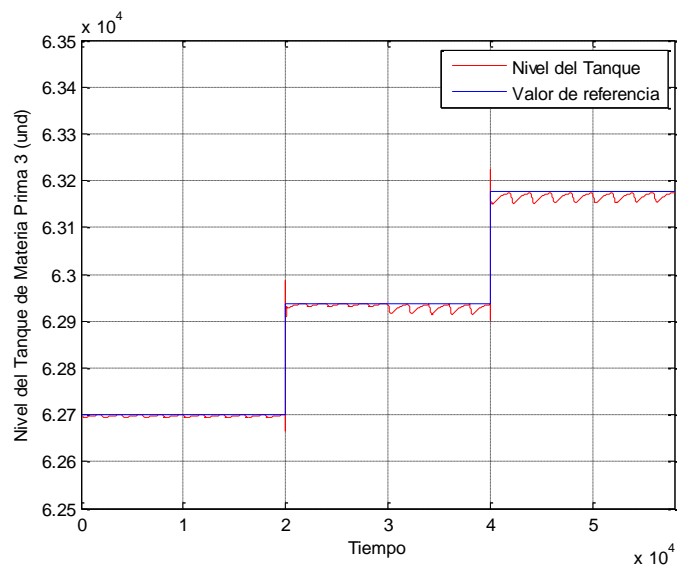


Ilustración 248 Variable MP 3 con PID en el proceso FFS – D2 – P2.

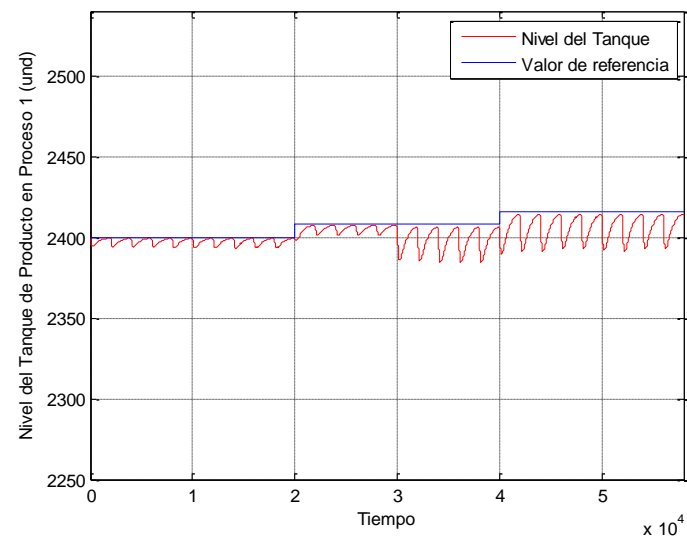


Ilustración 249 Variable PP 1 con PID en el proceso FFS – D2 – P2.

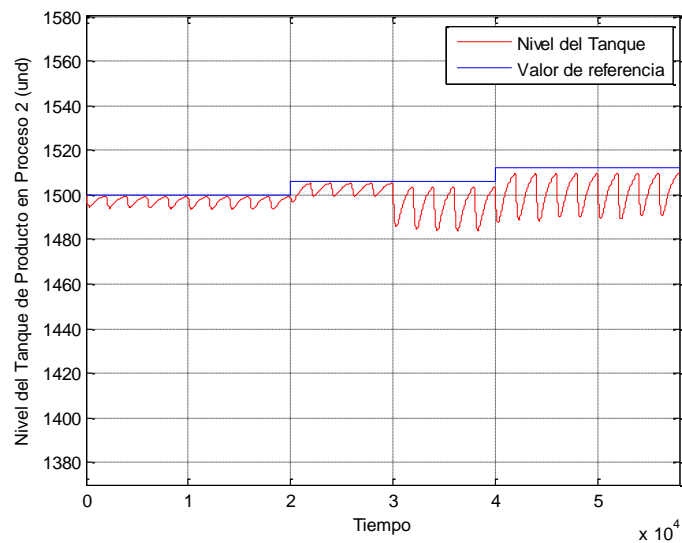


Ilustración 250 Variable PP 2 con PID en el proceso FFS – D2 – P2.

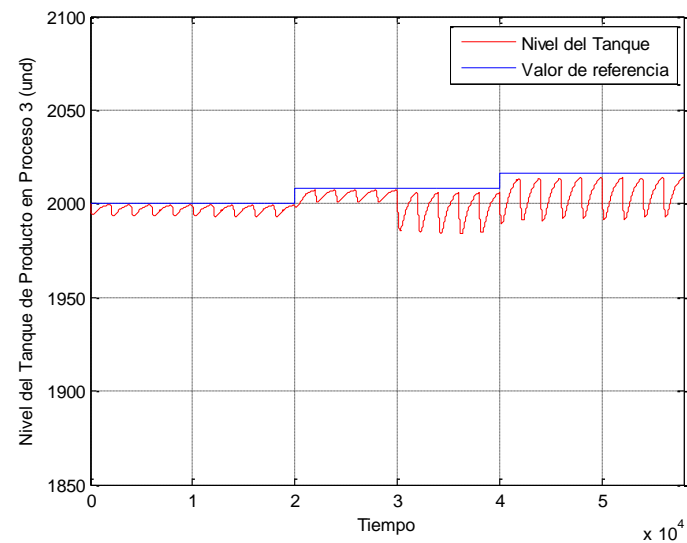


Ilustración 251 Variable PP 3 con PID en el proceso FFS – D2 – P2.

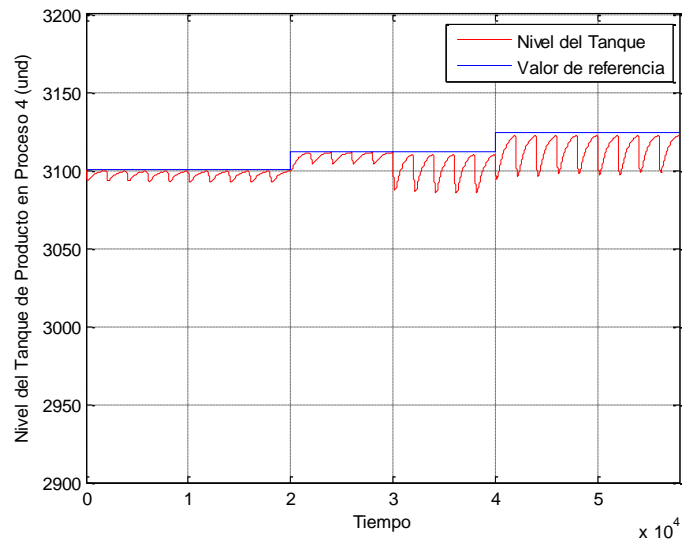


Ilustración 252 Variable PP 4 con PID en el proceso FFS – D2 – P2.

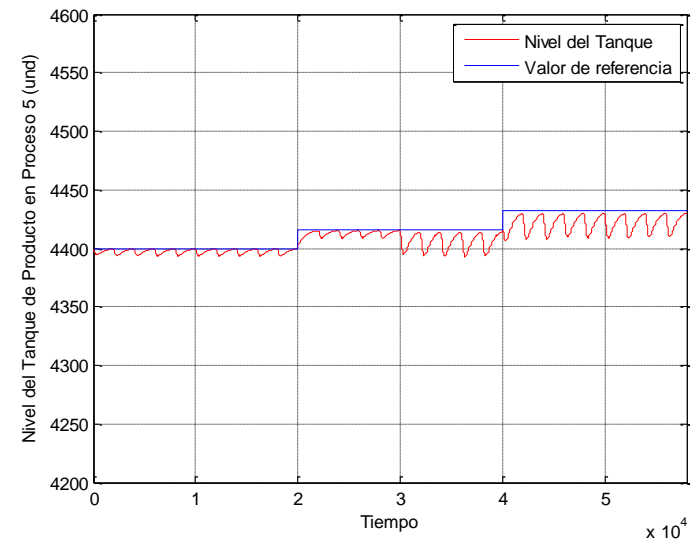


Ilustración 253 Variable PP 5 con PID en el proceso FFS – D2 – P2.

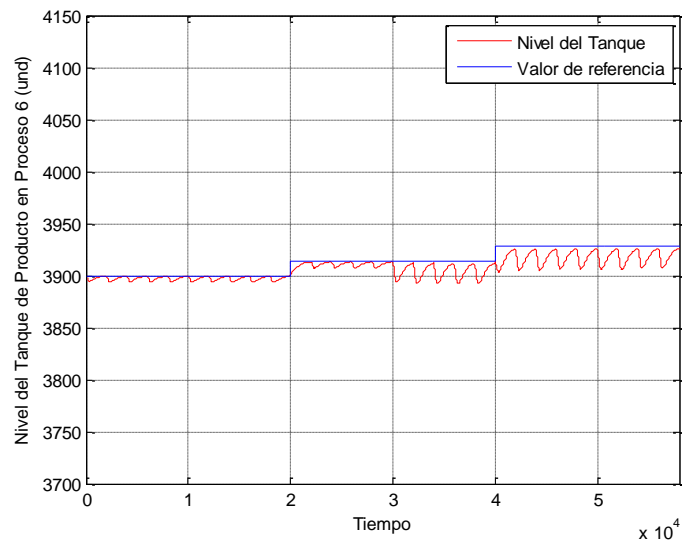


Ilustración 254 Variable PP 6 con PID en el proceso FFS – D2 – P2.

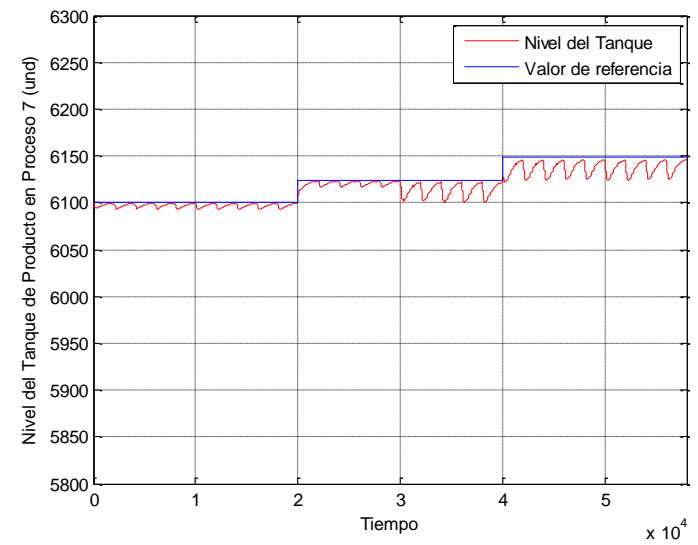


Ilustración 255 Variable PP 7 con PID en el proceso FFS – D2 – P2.

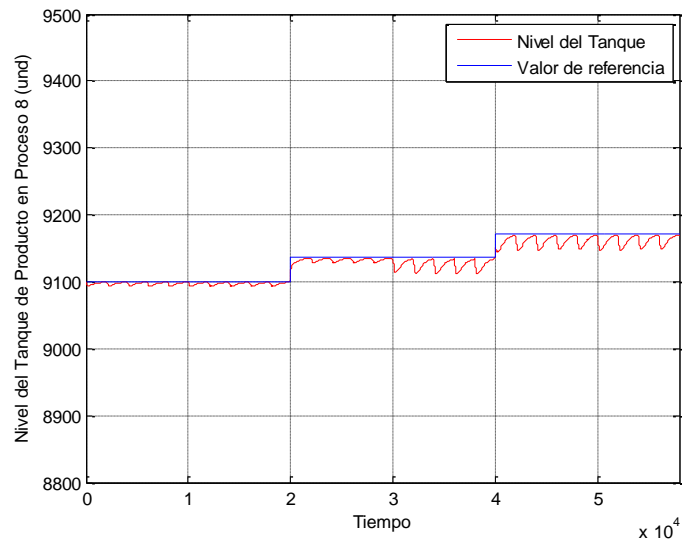


Ilustración 256 Variable PP 8 con PID en el proceso FFS - D2 - P2.

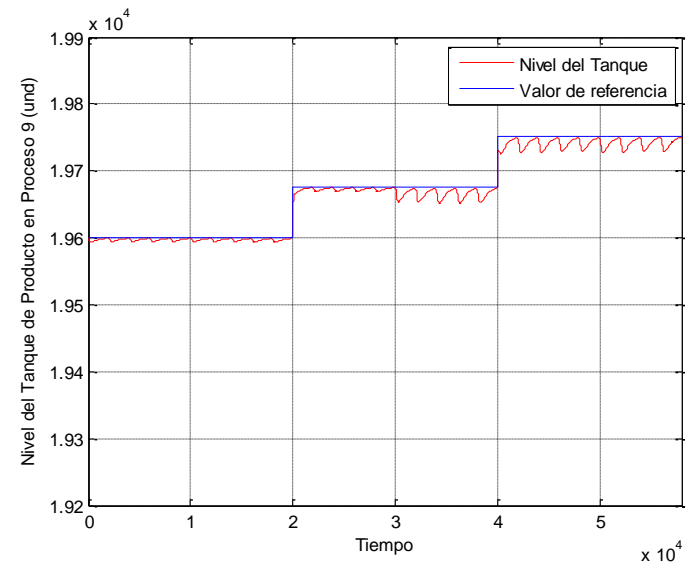


Ilustración 257 Variable PP 9 con PID en el proceso FFS - D2 - P2.

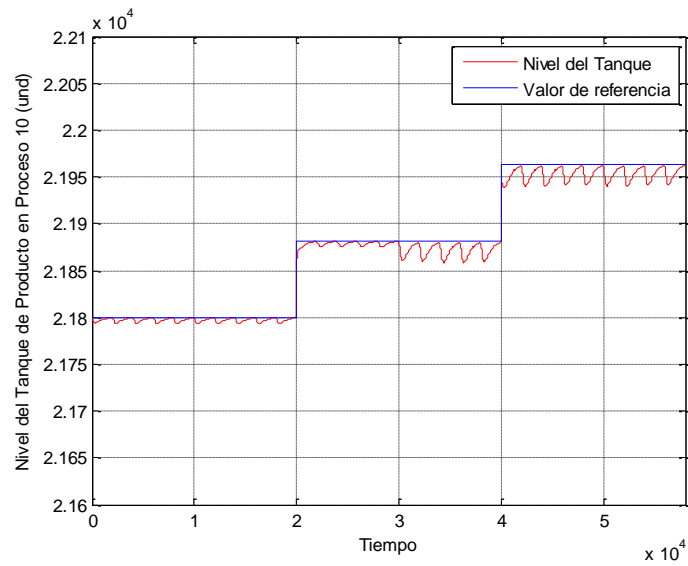


Ilustración 258 Variable PP 10 con PID en el proceso FFS - D2 - P2.

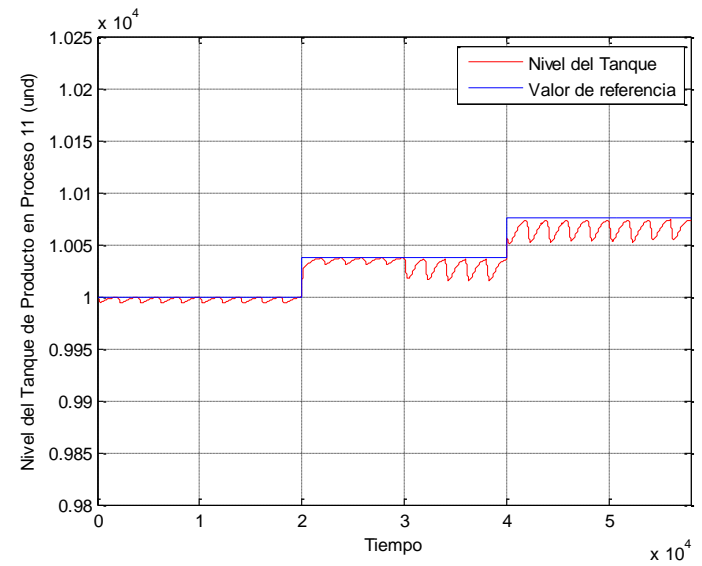


Ilustración 259 Variable PP 11 con PID en el proceso FFS - D2 - P2.

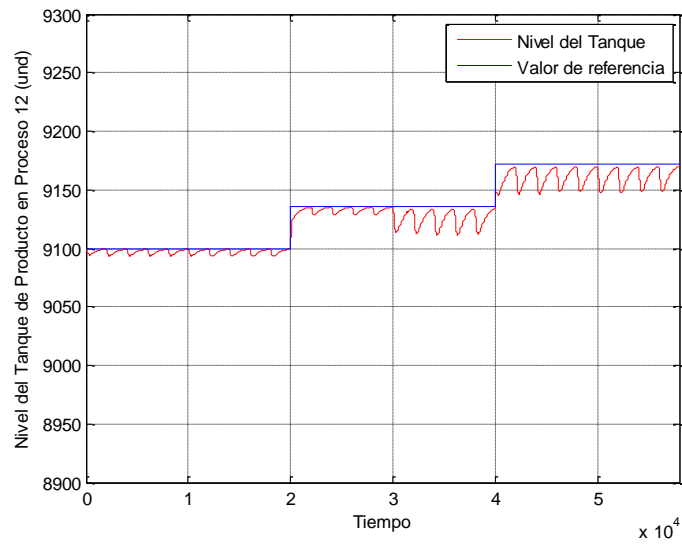


Ilustración 260 Variable PP 12 con PID en el proceso FFS – D2 – P2.

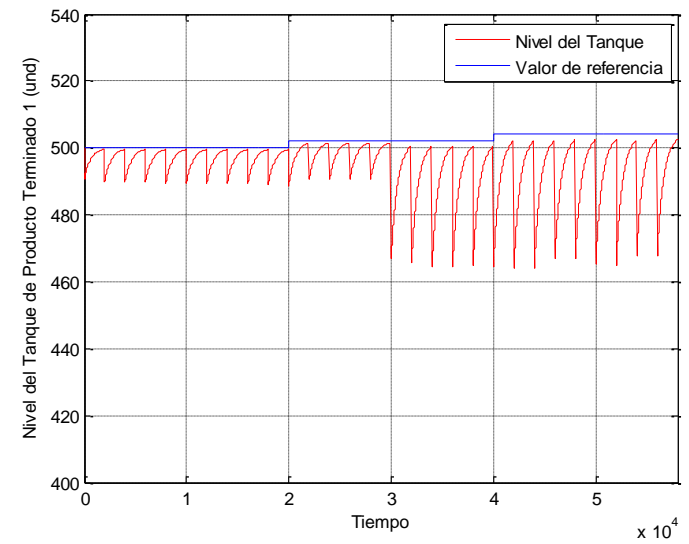


Ilustración 261 Variable PT 1 con PID en el proceso FFS – D2 – P2.

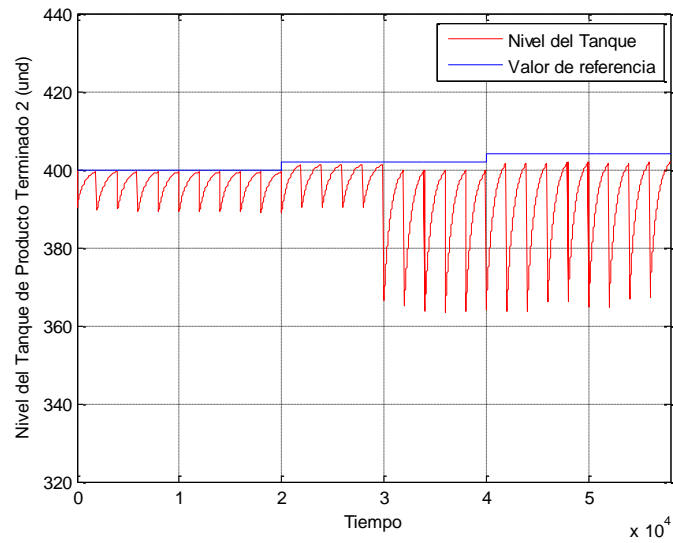


Ilustración 262 Variable PT 2 con PID en el proceso FFS – D2 – P2.

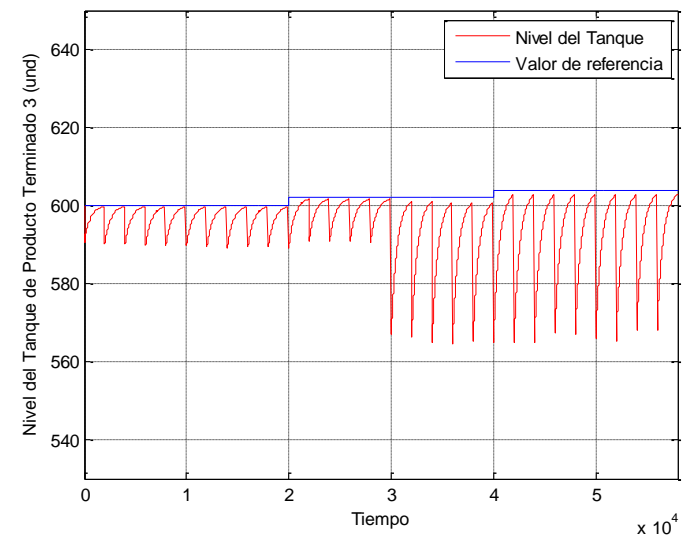


Ilustración 263 Variable PT 3 con PID en el proceso FFS – D2 – P2.

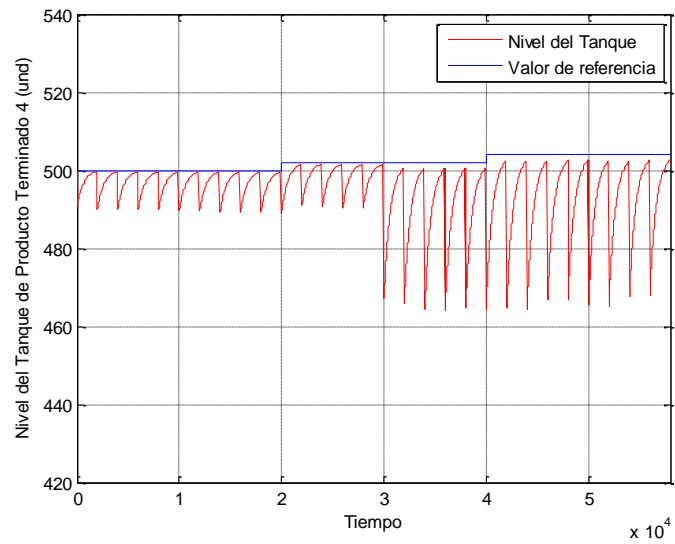


Ilustración 264 Variable PT 4 con PID en el proceso FFS – D2 – P2.

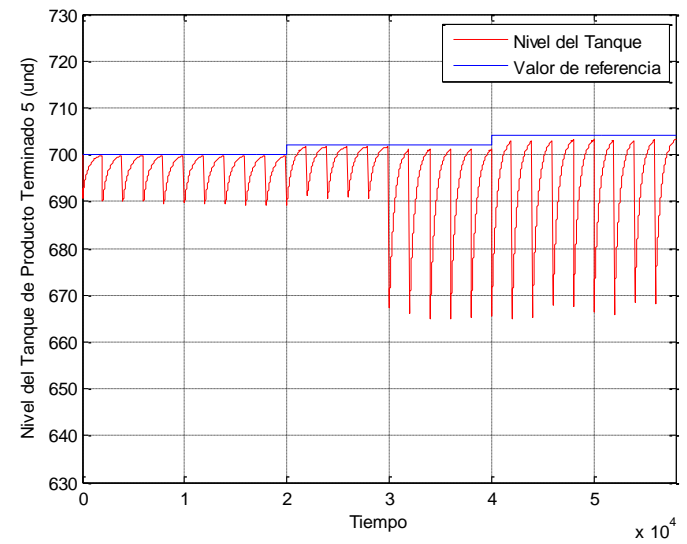


Ilustración 265 Variable PT 5 con PID en el proceso FFS – D2 – P2.

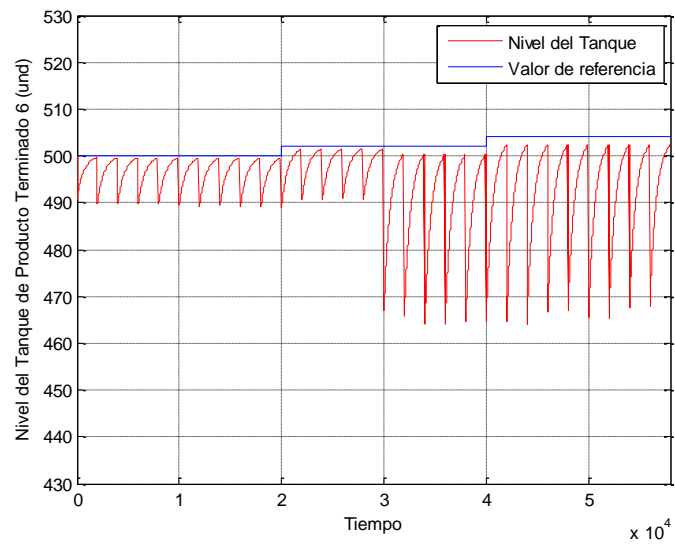


Ilustración 266 Variable PT 6 con PID en el proceso FFS – D2 – P2.

ANEXO 18. IMPLEMENTACIÓN PID AL PROCESO FFS CON D2 – P3.

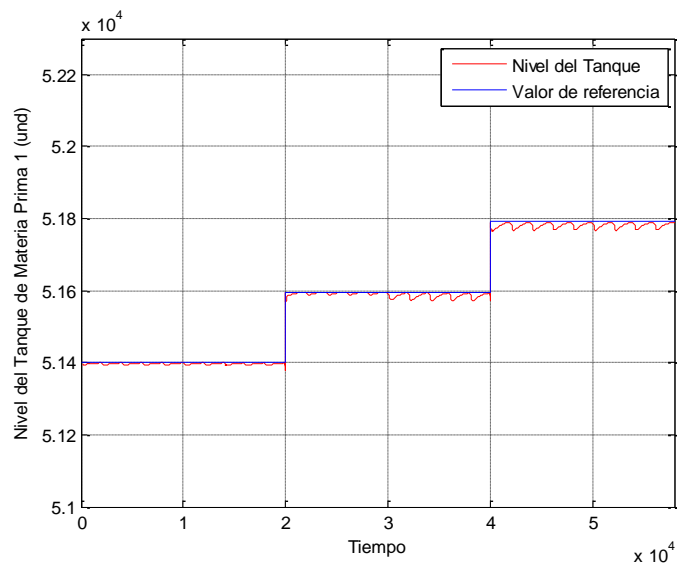


Ilustración 267 Variable MP 1 con PID en el proceso FFS – D2 – P3.

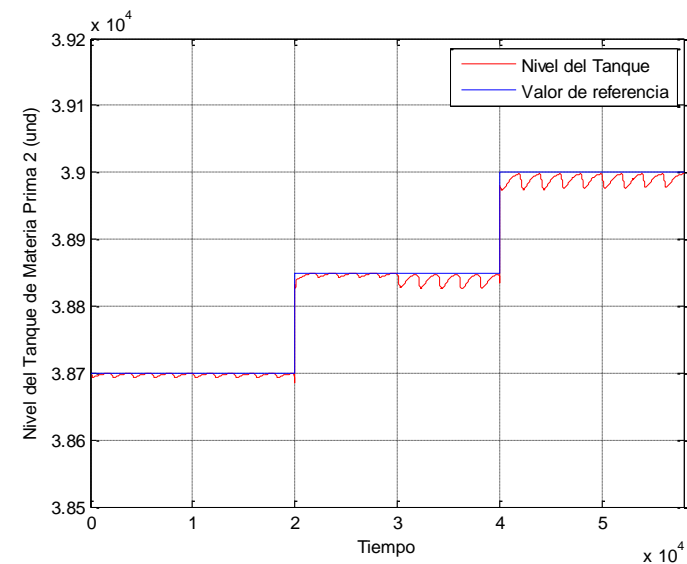


Ilustración 268 Variable MP 2 con PID en el proceso FFS – D2 – P3.

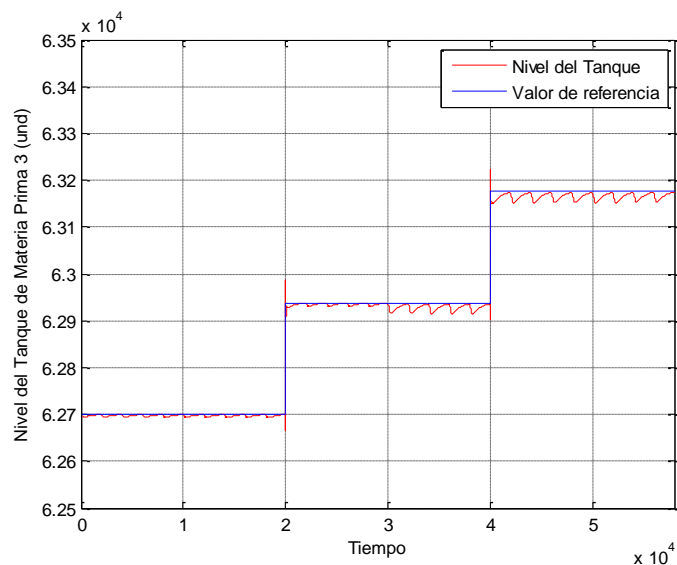


Ilustración 269 Variable MP 3 con PID en el proceso FFS – D2 – P3.

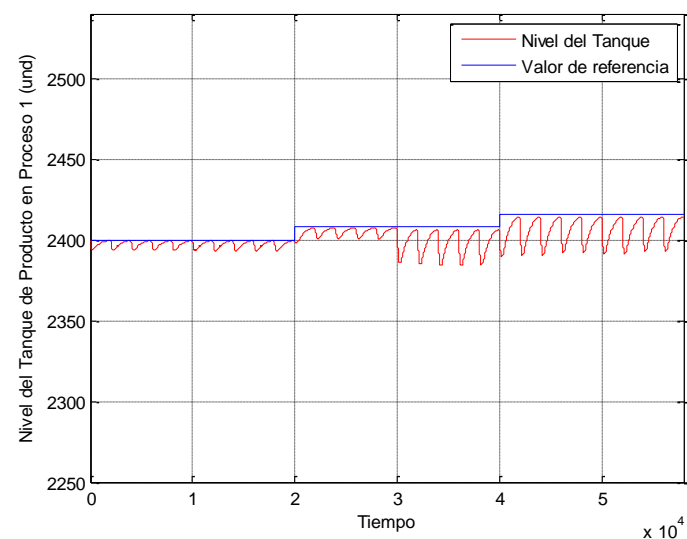


Ilustración 270 Variable PP 1 con PID en el proceso FFS – D2 – P3.

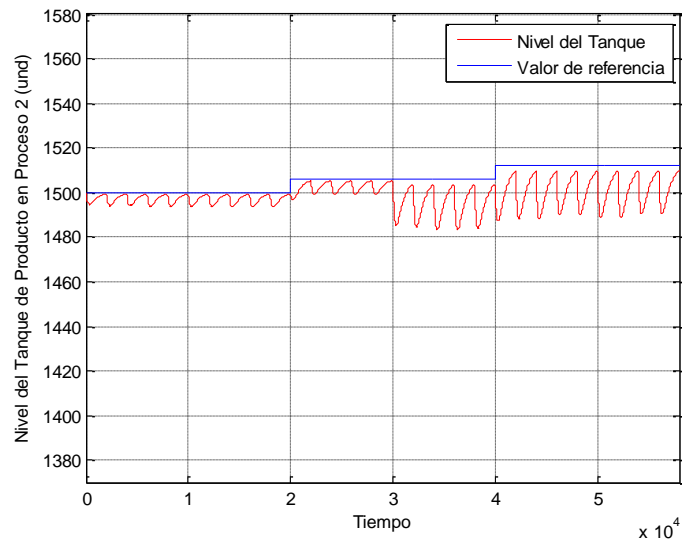


Ilustración 271 Variable PP 2 con PID en el proceso FFS – D2 – P3.

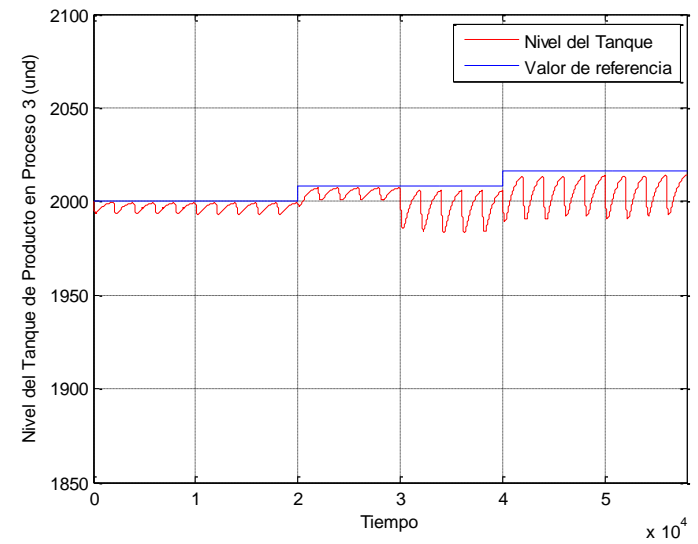


Ilustración 272 Variable PP 3 con PID en el proceso FFS – D2 – P3.

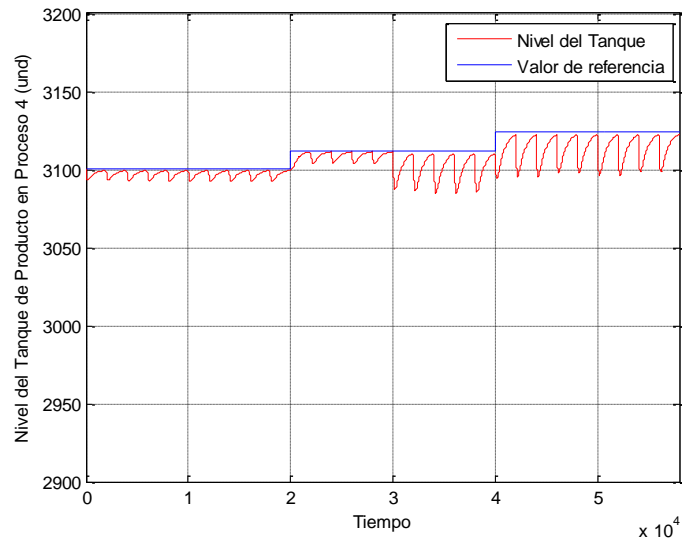


Ilustración 273 Variable PP 4 con PID en el proceso FFS – D2 – P3.

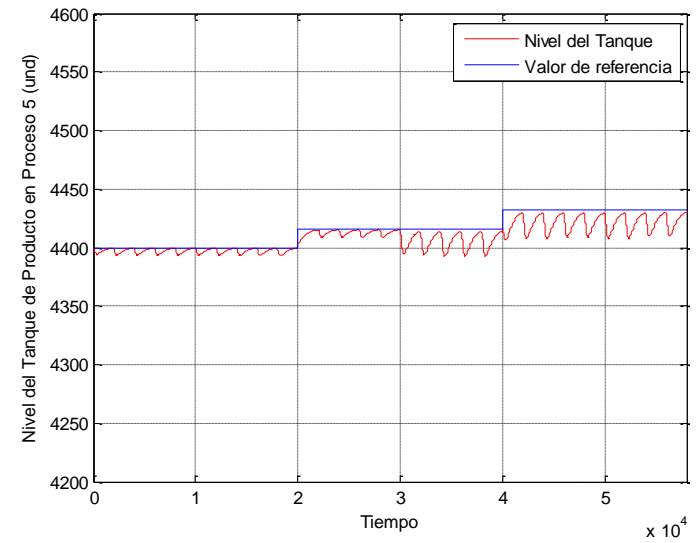


Ilustración 274 Variable PP 5 con PID en el proceso FFS – D2 – P3.

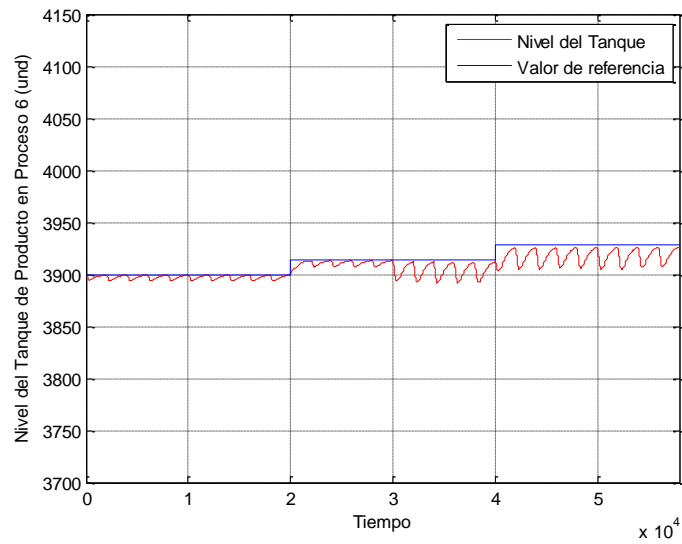


Ilustración 275 Variable PP 6 con PID en el proceso FFS – D2 – P3.

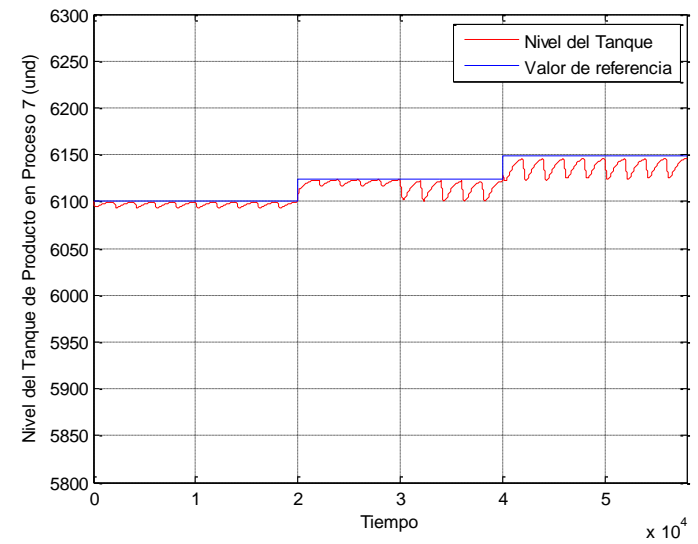


Ilustración 276 Variable PP 7 con PID en el proceso FFS – D2 – P3.

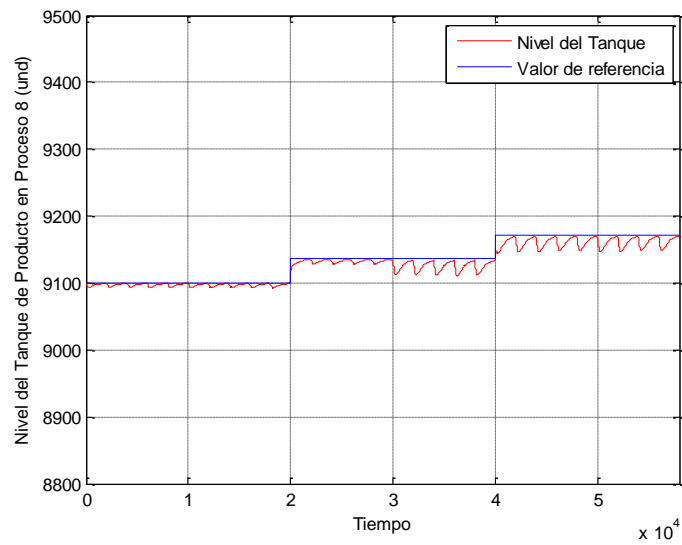


Ilustración 277 Variable PP 8 con PID en el proceso FFS – D2 – P3.

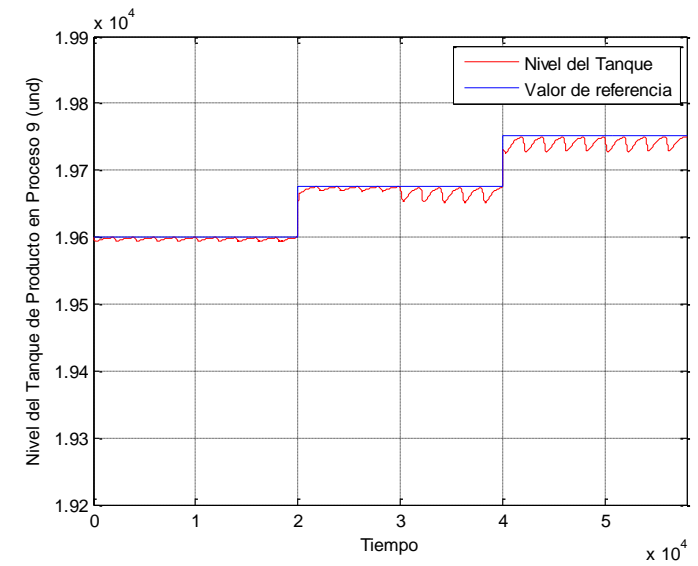


Ilustración 278 Variable PP 9 con PID en el proceso FFS – D2 – P3.



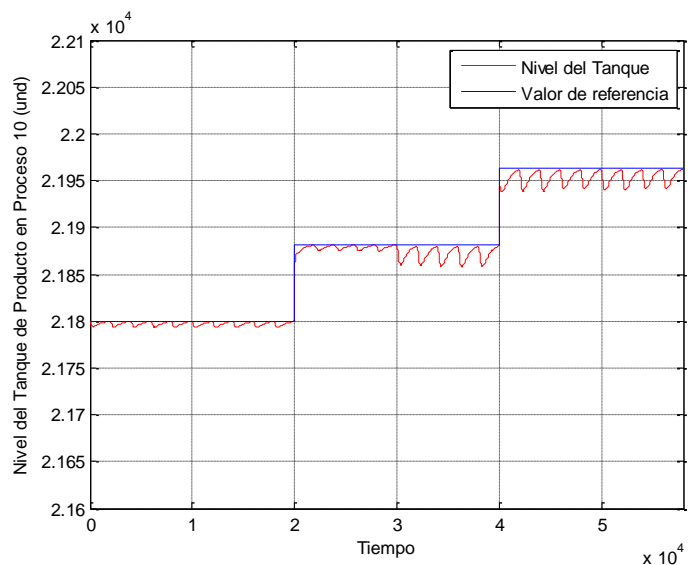


Ilustración 279 Variable PP 10 con PID en el proceso FFS – D2 – P3.

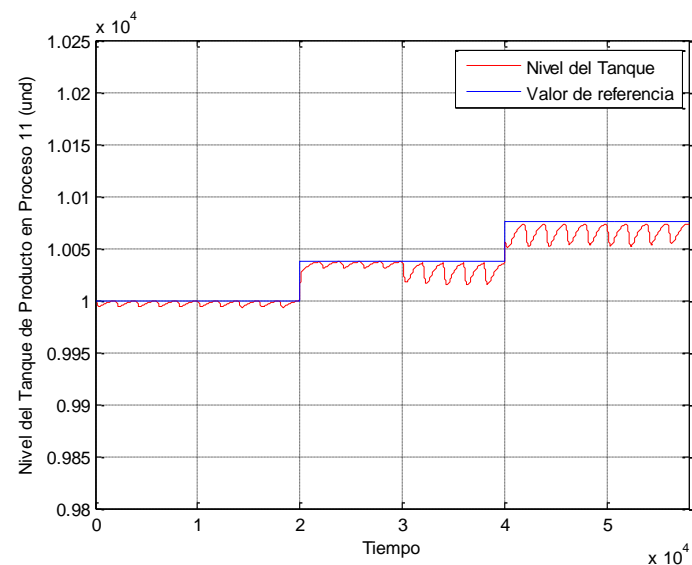


Ilustración 280 Variable PP 11 con PID en el proceso FFS – D2 – P3.

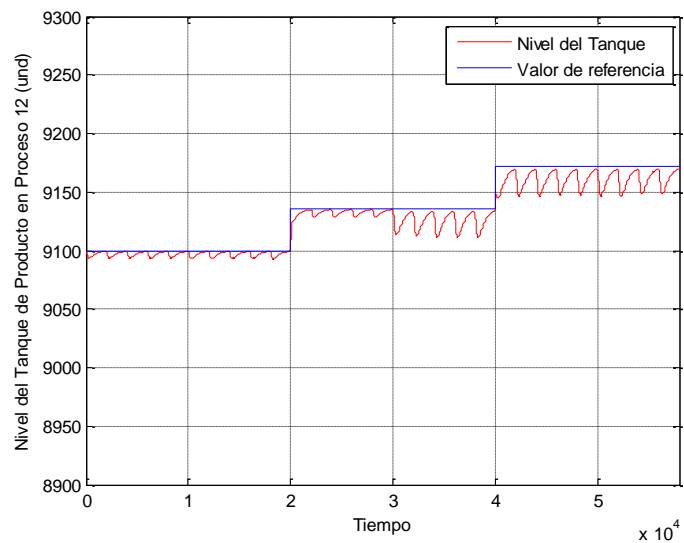


Ilustración 281 Variable PP 12 con PID en el proceso FFS – D2 – P3.

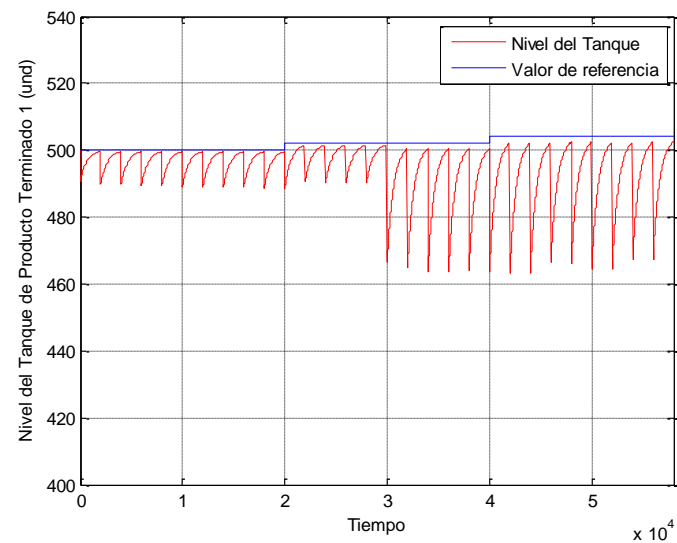


Ilustración 282 Variable PT 1 con PID en el proceso FFS – D2 – P3.

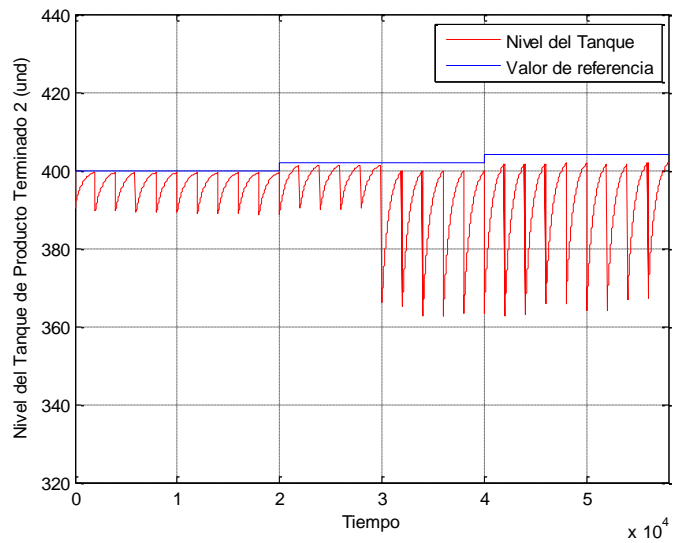


Ilustración 283 Variable PT 2 con PID en el proceso FFS – D2 – P3.

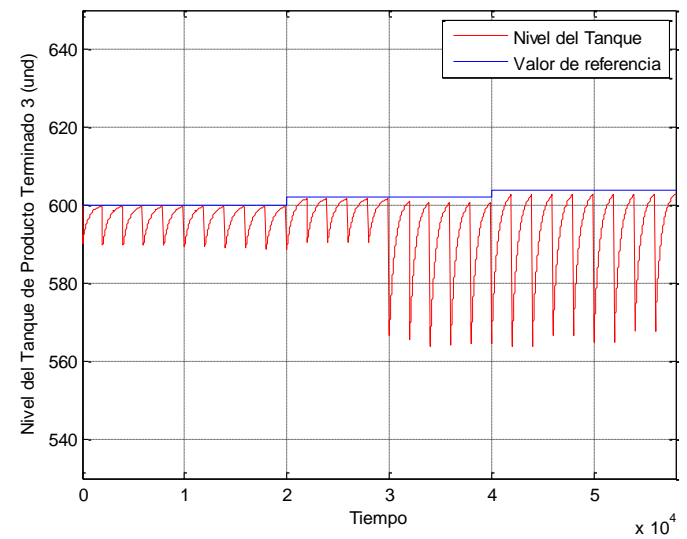


Ilustración 284 Variable PT 3 con PID en el proceso FFS – D2 – P3.

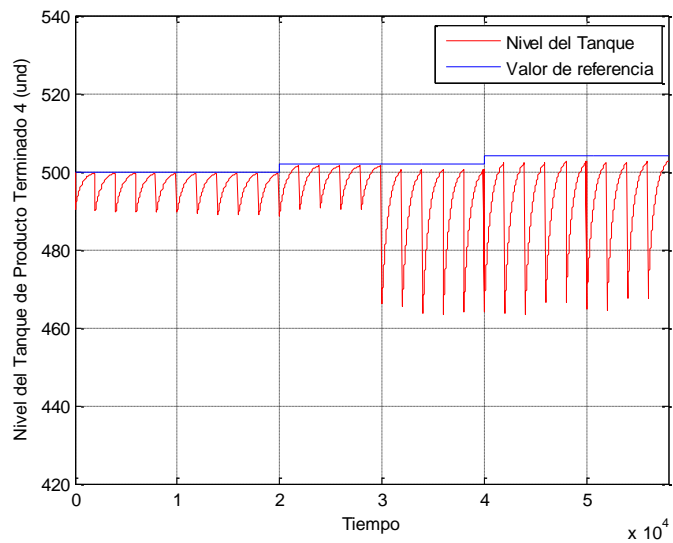


Ilustración 285 Variable PT 4 con PID en el proceso FFS – D2 – P3.

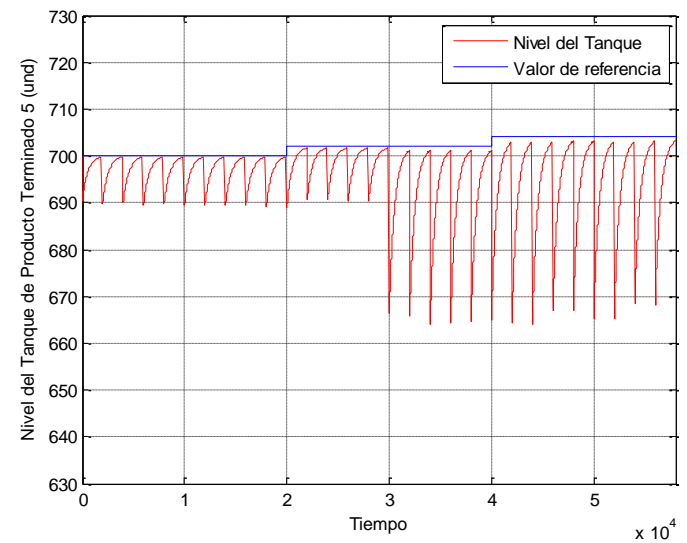


Ilustración 286 Variable PT 5 con PID en el proceso FFS – D2 – P3.

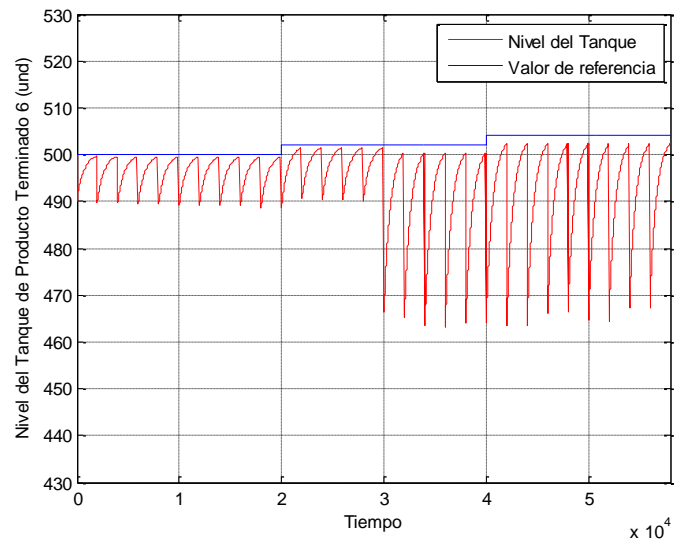


Ilustración 287 Variable PT 6 con PID en el proceso FFS – D2 – P3.

#### ANEXO 19. IMPLEMENTACIÓN PID AL PROCESO FFS CON D3 – P1.

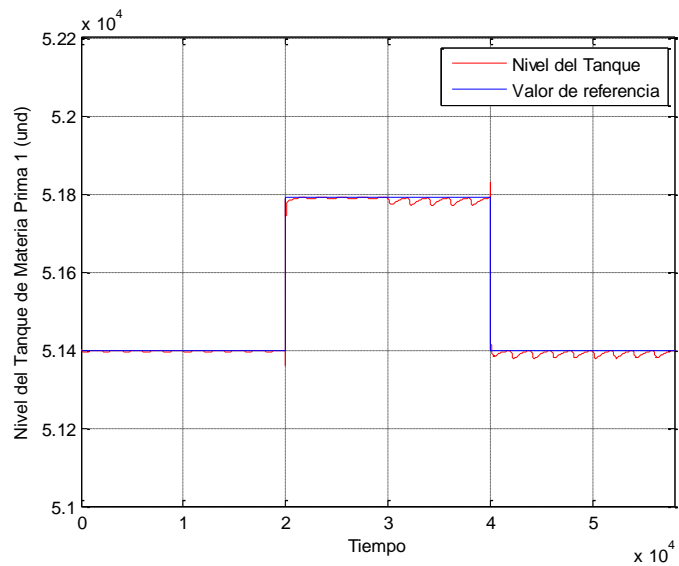


Ilustración 288 Variable MP 1 con PID en el proceso FFS – D3 – P1.

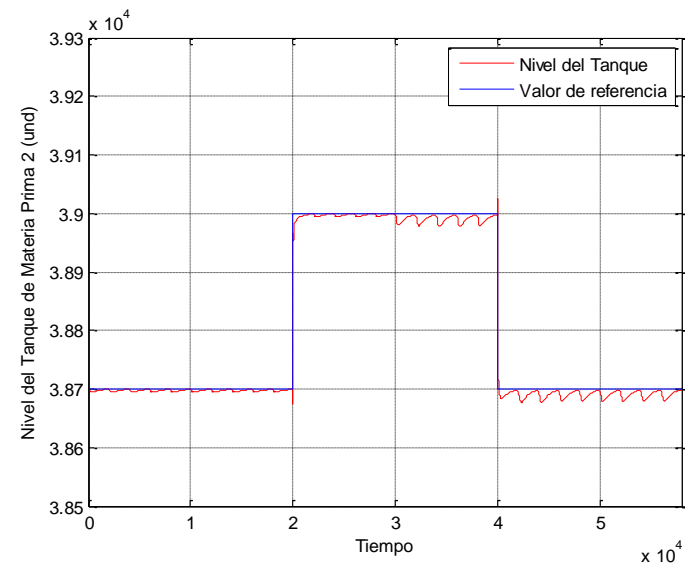


Ilustración 289 Variable MP 2 con PID en el proceso FFS – D3 – P1.

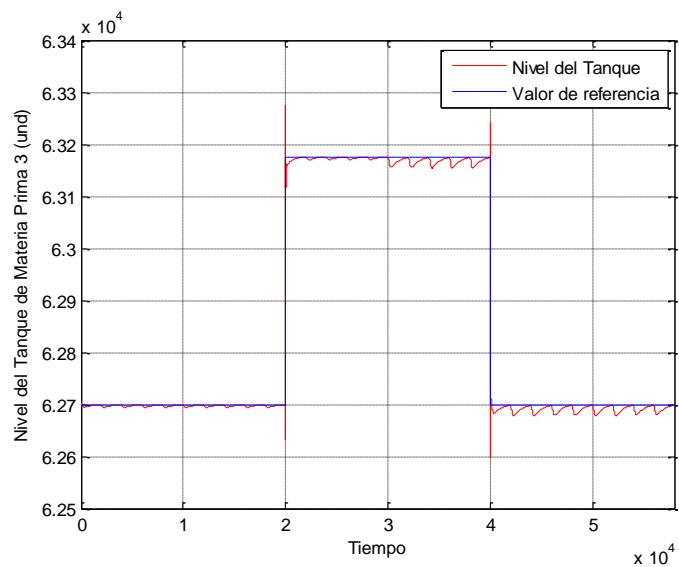


Ilustración 290 Variable MP 3 con PID en el proceso FFS – D3 – P1.

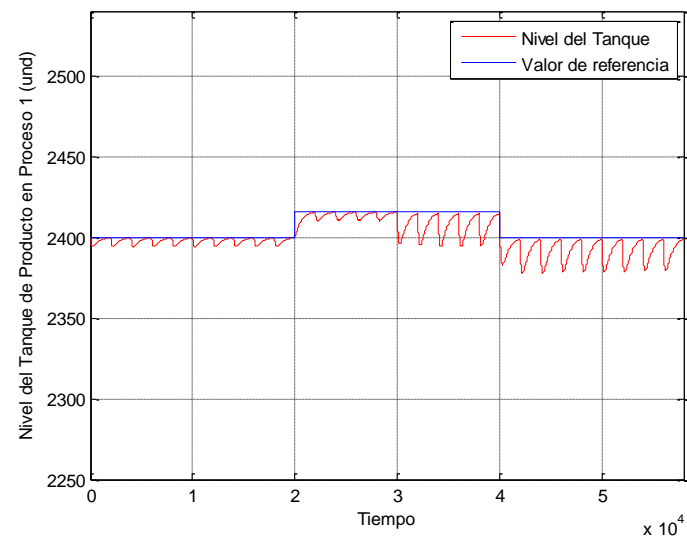


Ilustración 291 Variable PP 1 con PID en el proceso FFS – D3 – P1.

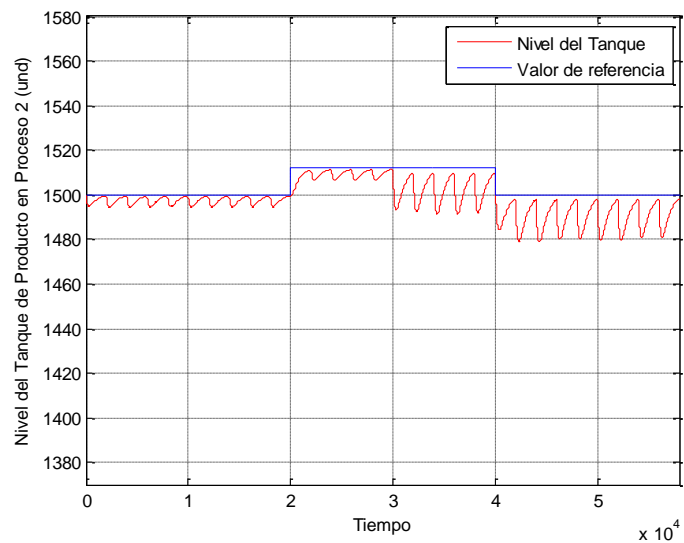


Ilustración 292 Variable PP 2 con PID en el proceso FFS – D3 – P1.

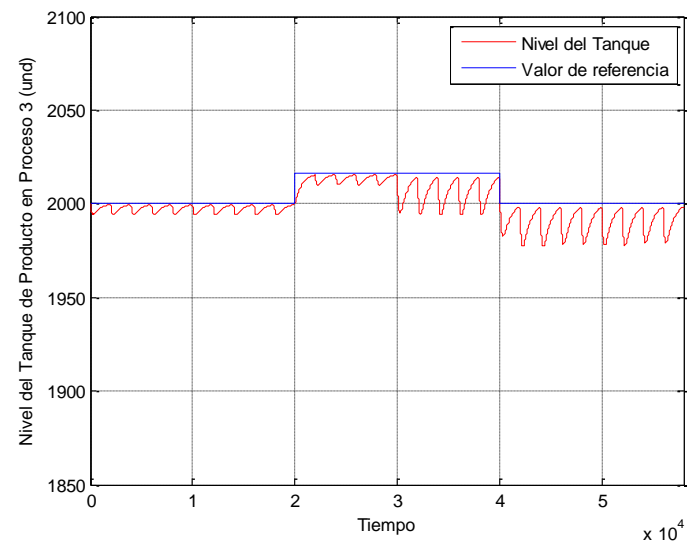


Ilustración 293 Variable PP 3 con PID en el proceso FFS – D3 – P1.

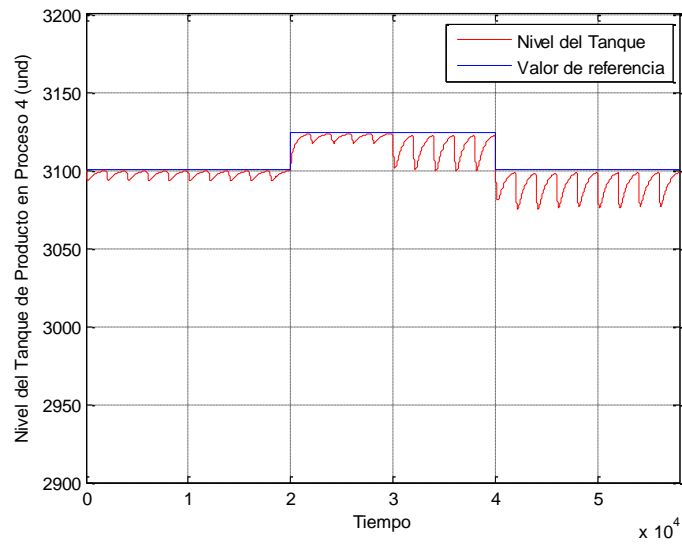


Ilustración 294 Variable PP 4 con PID en el proceso FFS – D3 – P1.

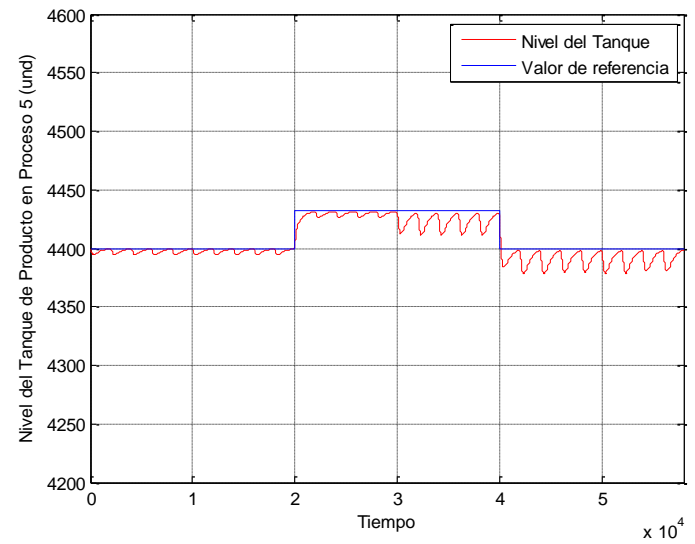


Ilustración 295 Variable PP 5 con PID en el proceso FFS – D3 – P1.

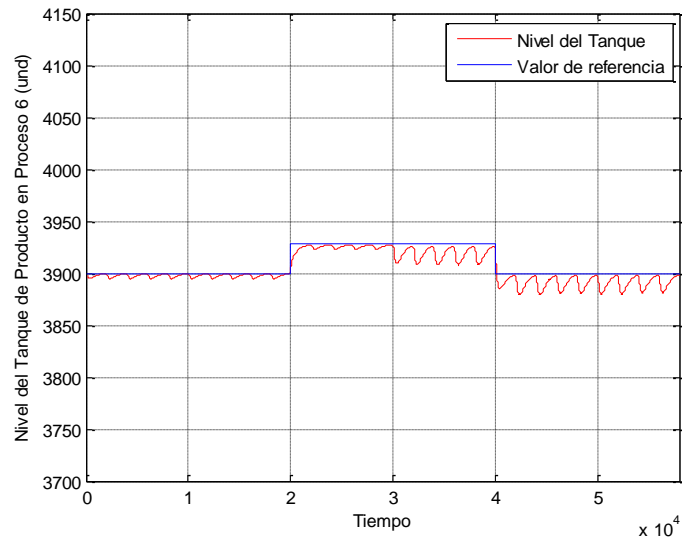


Ilustración 296 Variable PP 6 con PID en el proceso FFS – D3 – P1.

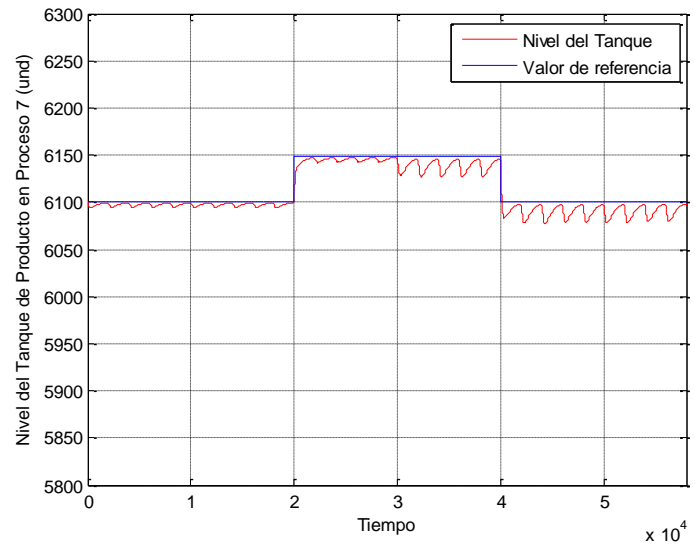


Ilustración 297 Variable PP 7 con PID en el proceso FFS – D3 – P1.

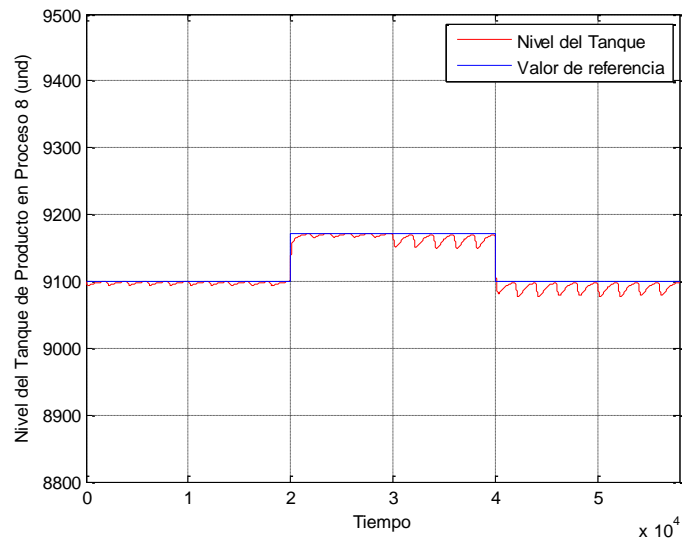


Ilustración 298 Variable PP 8 con PID en el proceso FFS – D3 – P1.

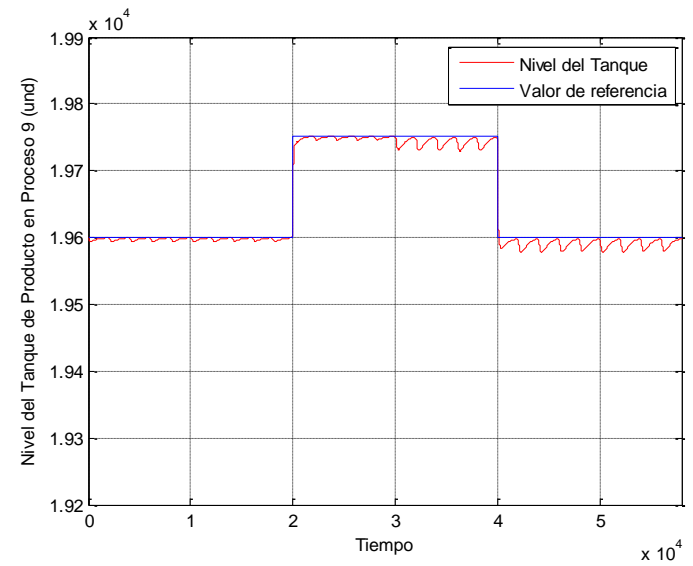


Ilustración 299 Variable PP 9 con PID en el proceso FFS – D3 – P1.

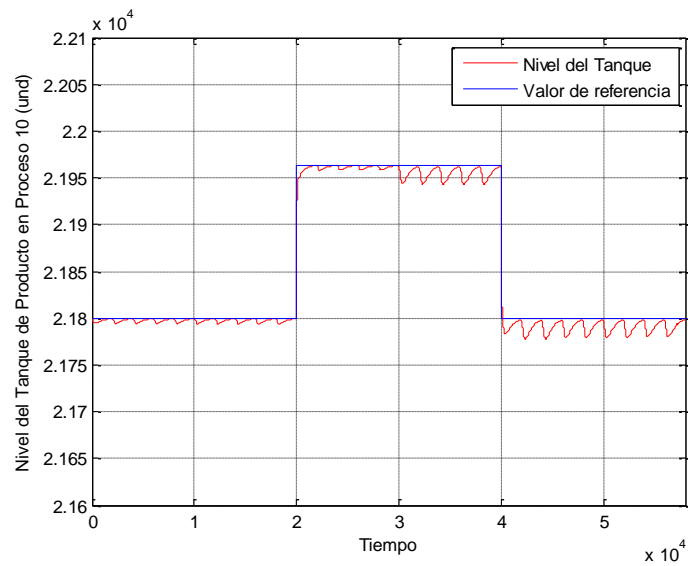


Ilustración 300 Variable PP 10 con PID en el proceso FFS – D3 – P1.

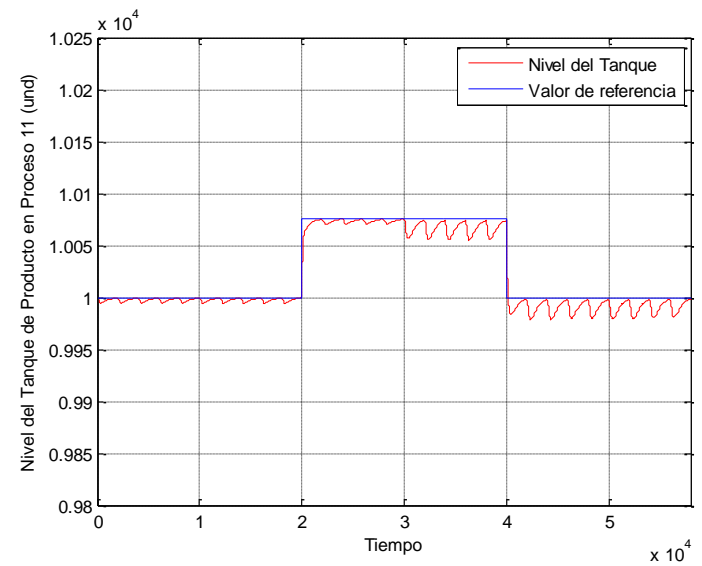


Ilustración 301 Variable PP 11 con PID en el proceso FFS – D3 – P1.

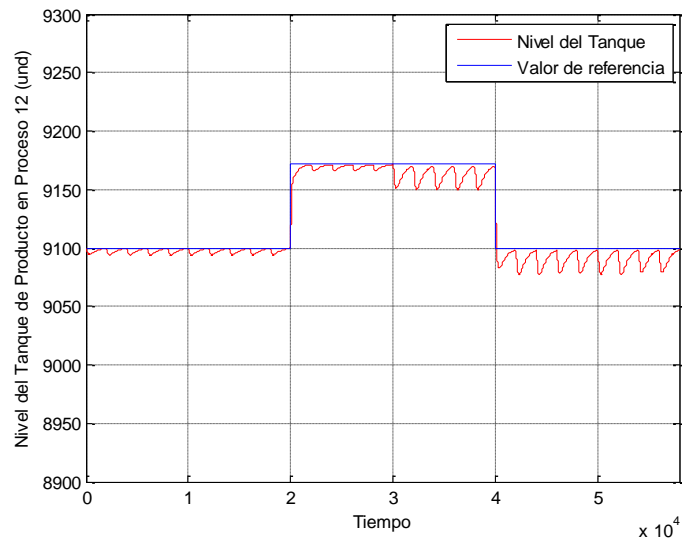


Ilustración 302 Variable PP 12 con PID en el proceso FFS – D3 – P1.

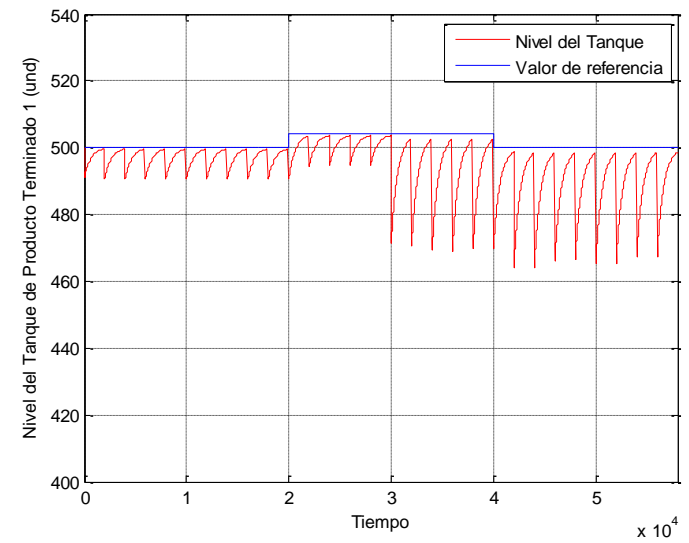


Ilustración 303 Variable PT 1 con PID en el proceso FFS – D3 – P1.

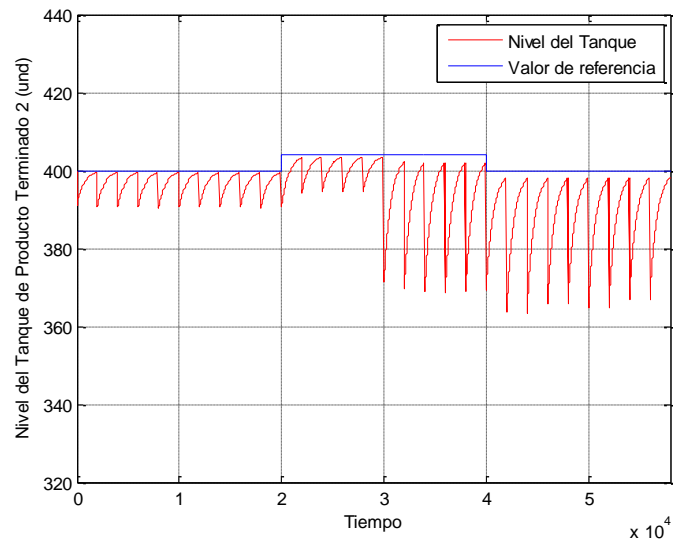


Ilustración 304 Variable PT 2 con PID en el proceso FFS – D3 – P1.

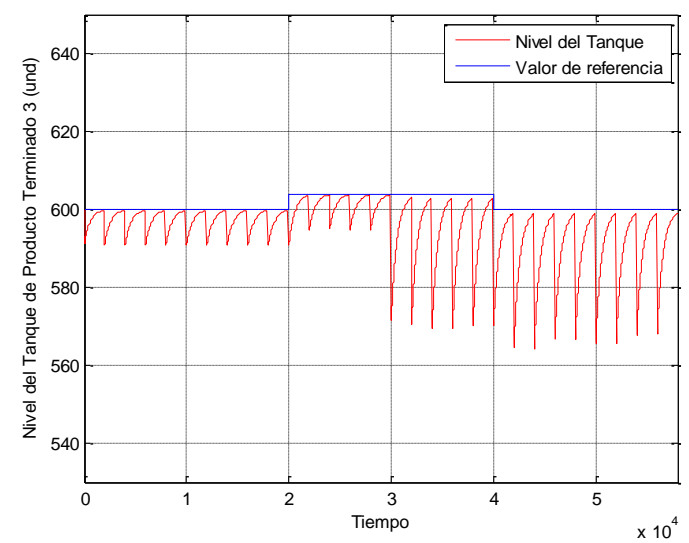


Ilustración 305 Variable PT 3 con PID en el proceso FFS – D3 – P1.

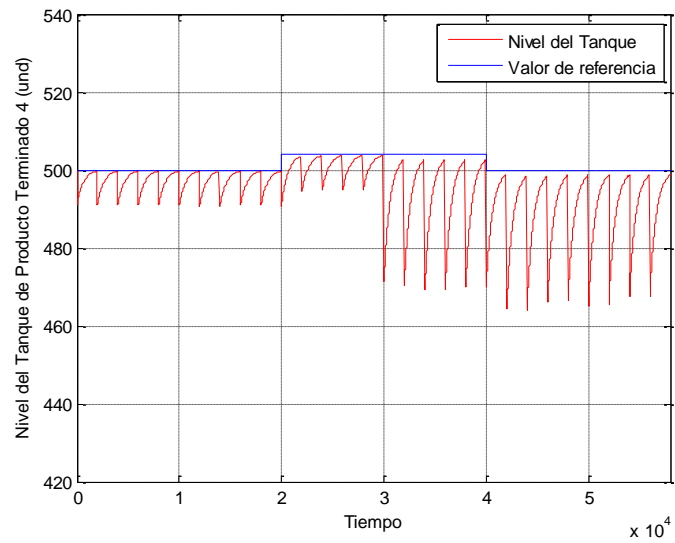


Ilustración 306 Variable PT 4 con PID en el proceso FFS – D3 – P1.

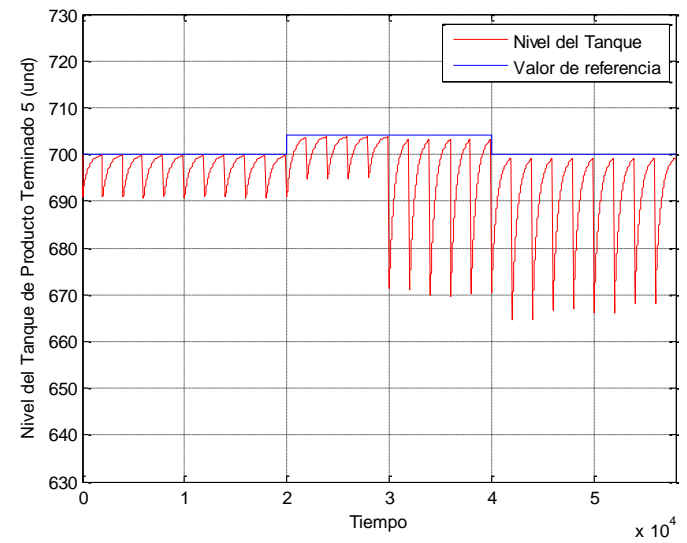


Ilustración 307 Variable PT 5 con PID en el proceso FFS – D3 – P1.

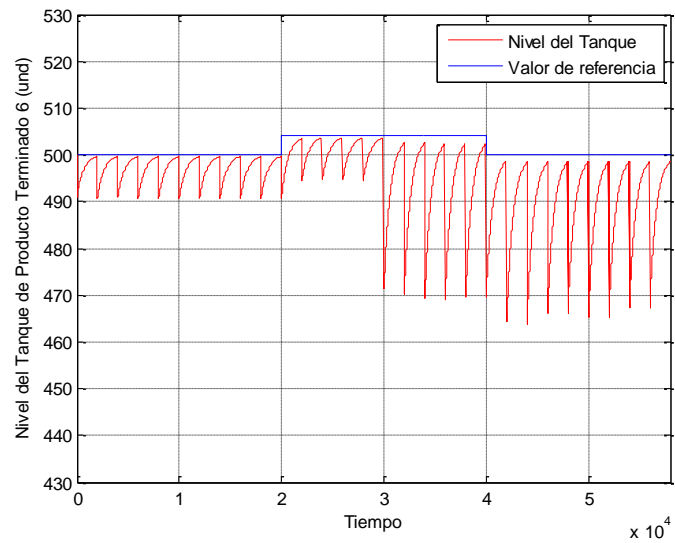


Ilustración 308 Variable PT 6 con PID en el proceso FFS – D3 – P1.



ANEXO 20. IMPLEMENTACIÓN PID AL PROCESO FFS CON D3 – P2.

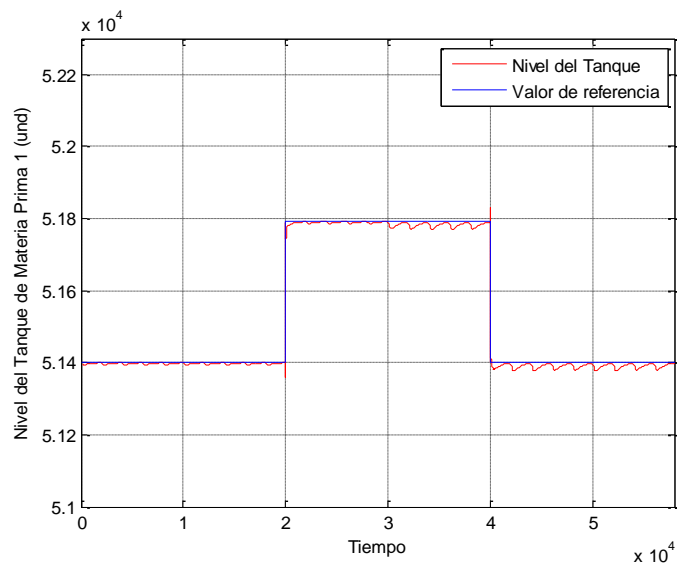


Ilustración 309 Variable MP 1 con PID en el proceso FFS – D3 – P2.

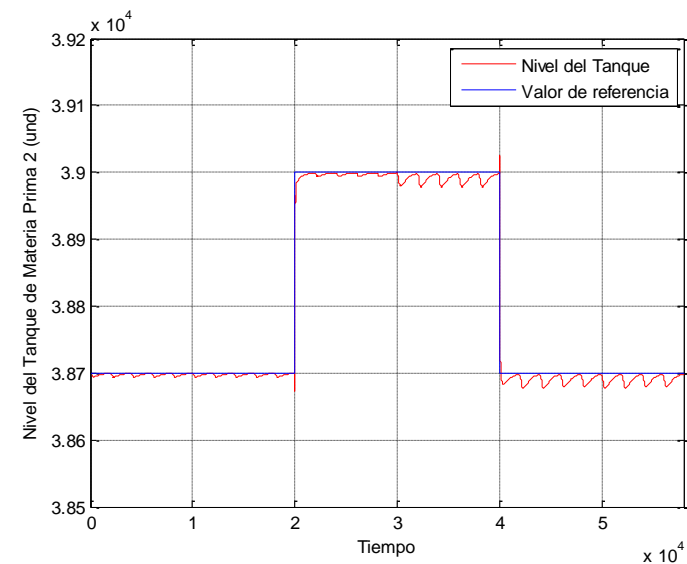


Ilustración 310 Variable MP 2 con PID en el proceso FFS – D3 – P2.

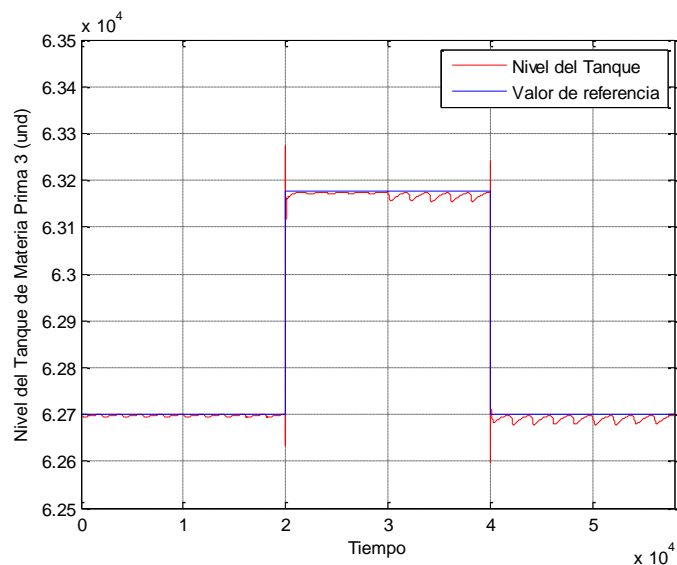


Ilustración 311 Variable MP 3 con PID en el proceso FFS – D3 – P2.

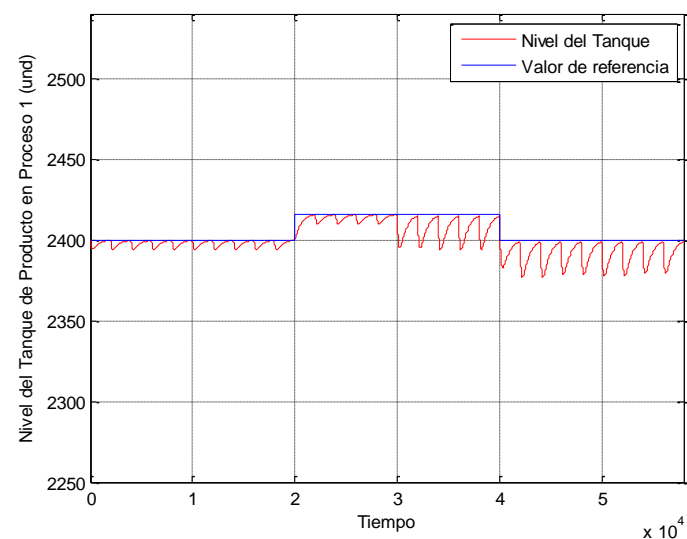


Ilustración 312 Variable PP 1 con PID en el proceso FFS – D3 – P2.

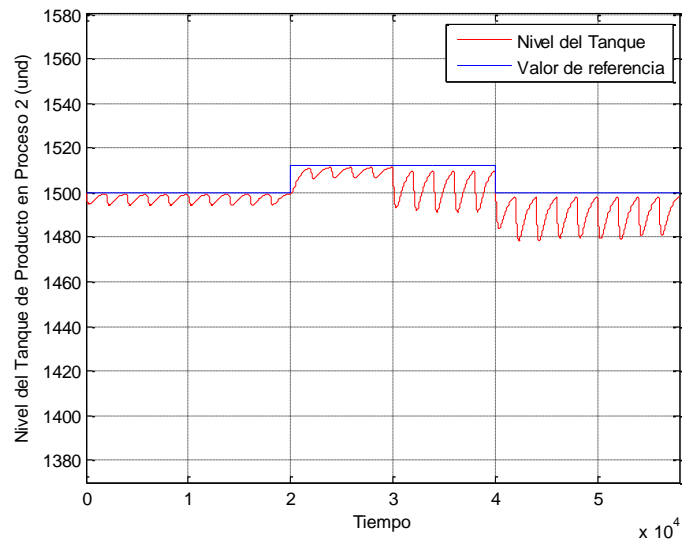


Ilustración 313 Variable PP 2 con PID en el proceso FFS – D3 – P2.

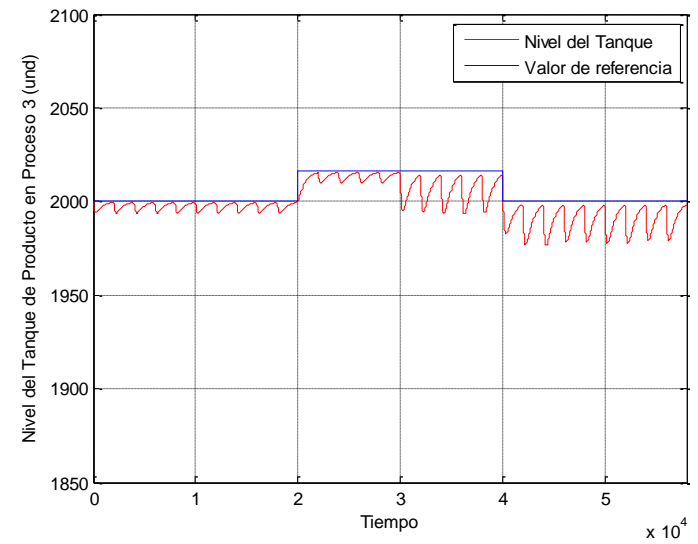


Ilustración 314 Variable PP 3 con PID en el proceso FFS – D3 – P2.

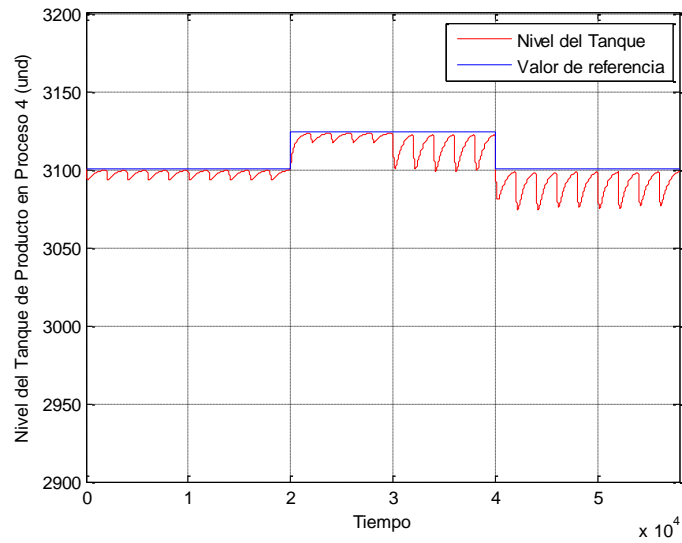


Ilustración 315 Variable PP 4 con PID en el proceso FFS – D3 – P2.

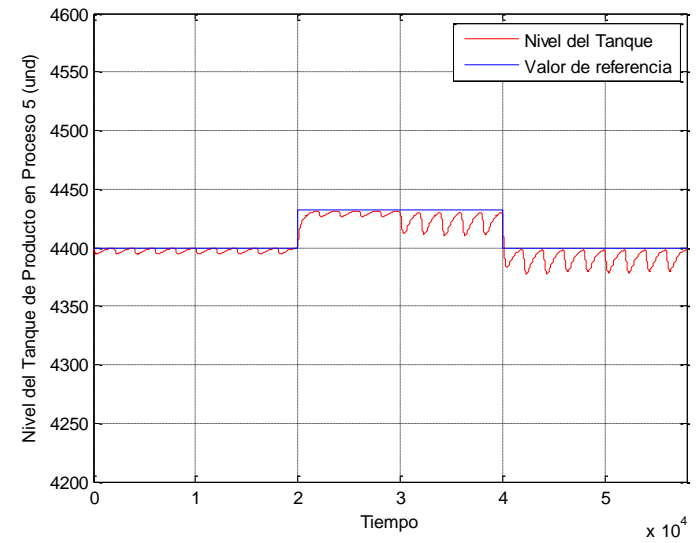


Ilustración 316 Variable PP 5 con PID en el proceso FFS – D3 – P2.

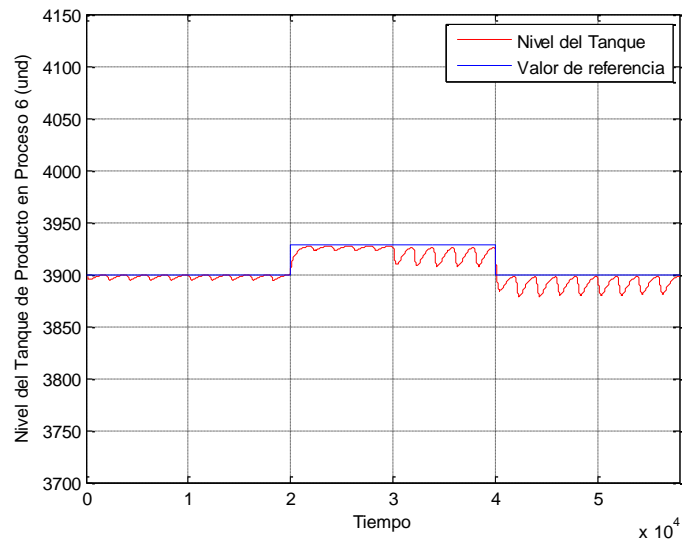


Ilustración 317 Variable PP 6 con PID en el proceso FFS – D3 – P2.

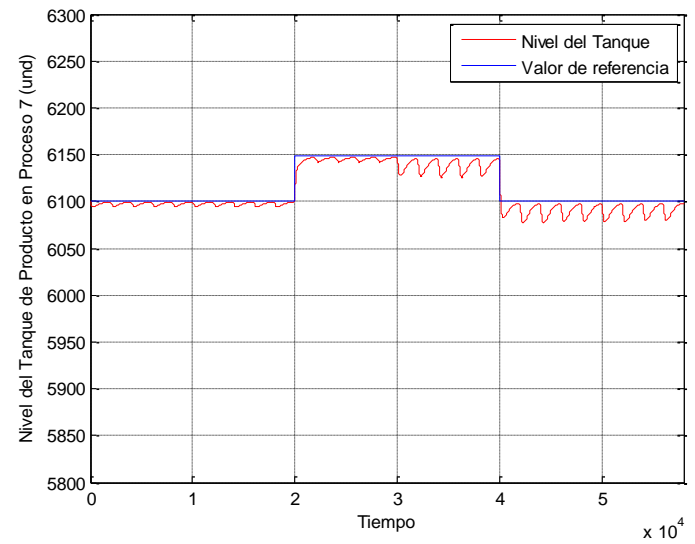


Ilustración 318 Variable PP 7 con PID en el proceso FFS – D3 – P2.

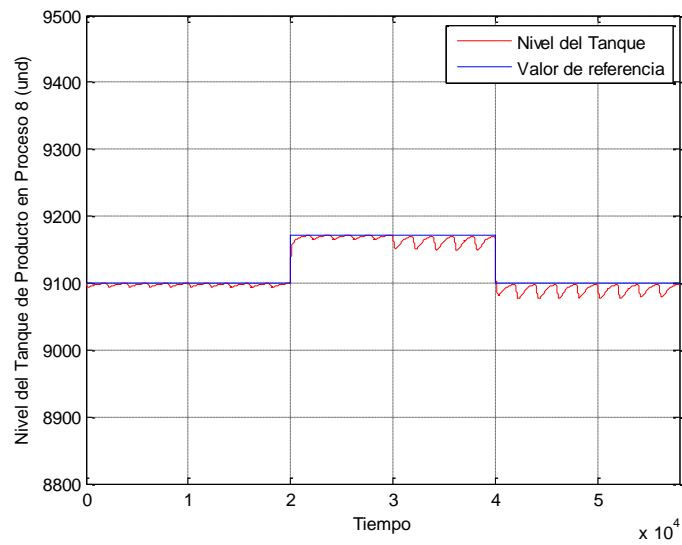


Ilustración 319 Variable PP 8 con PID en el proceso FFS – D3 – P2.

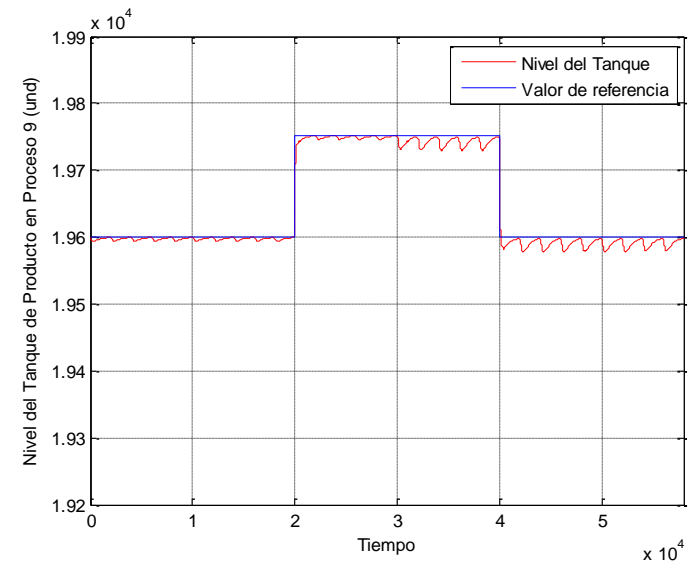


Ilustración 320 Variable PP 9 con PID en el proceso FFS – D3 – P2.

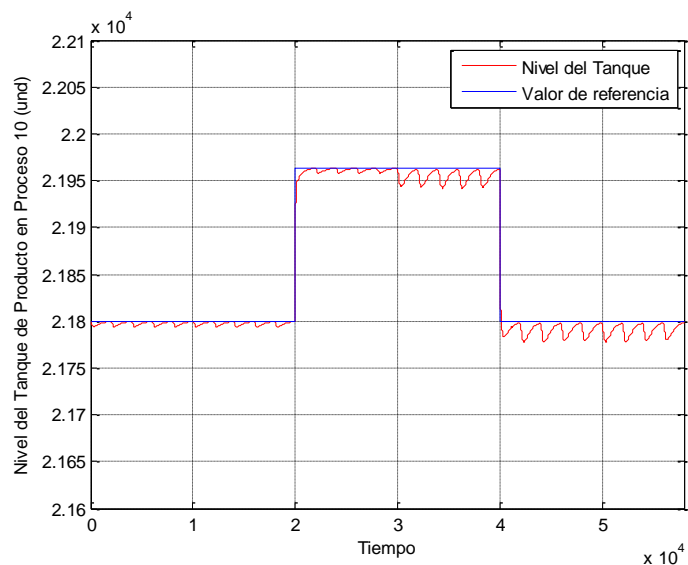


Ilustración 321 Variable PP 10 con PID en el proceso FFS – D3 – P2.

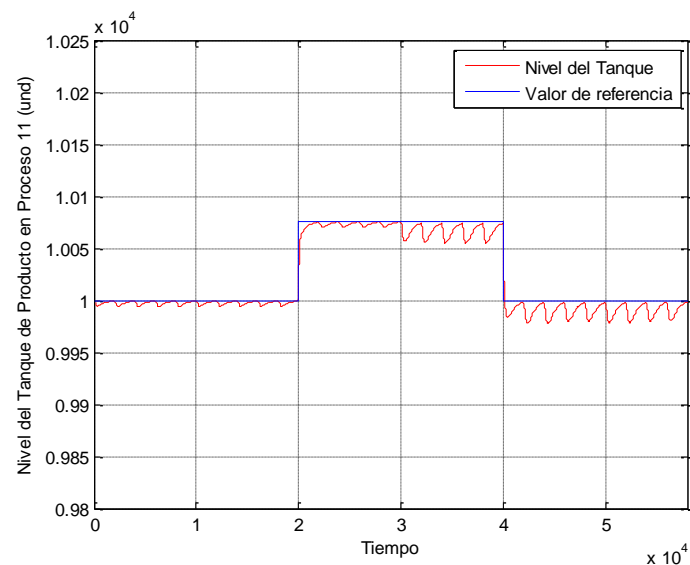


Ilustración 322 Variable PP 11 con PID en el proceso FFS – D3 – P2.

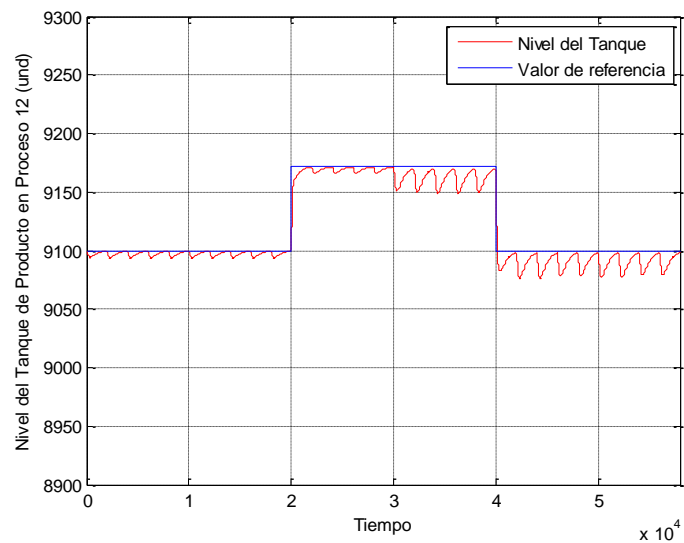


Ilustración 323 Variable PP 12 con PID en el proceso FFS – D3 – P2.

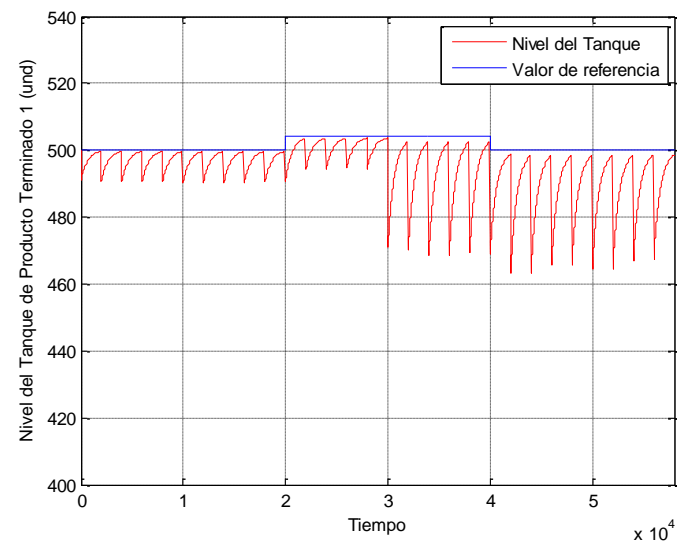


Ilustración 324 Variable PT 1 con PID en el proceso FFS – D3 – P2.

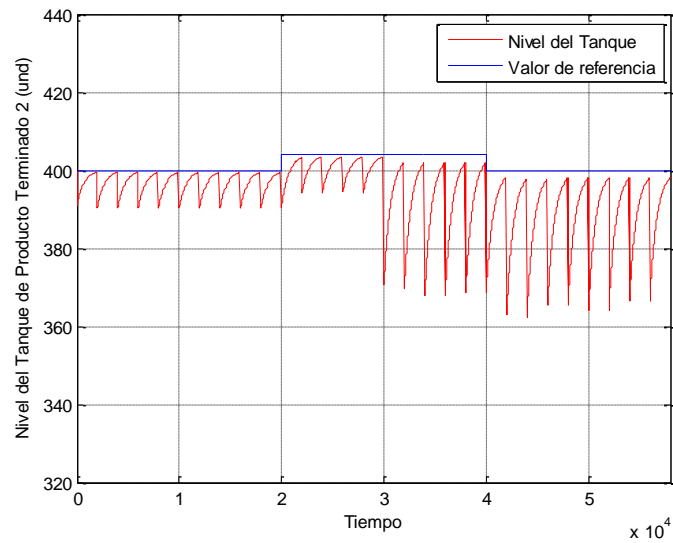


Ilustración 325 Variable PT 2 con PID en el proceso FFS – D3 – P2.

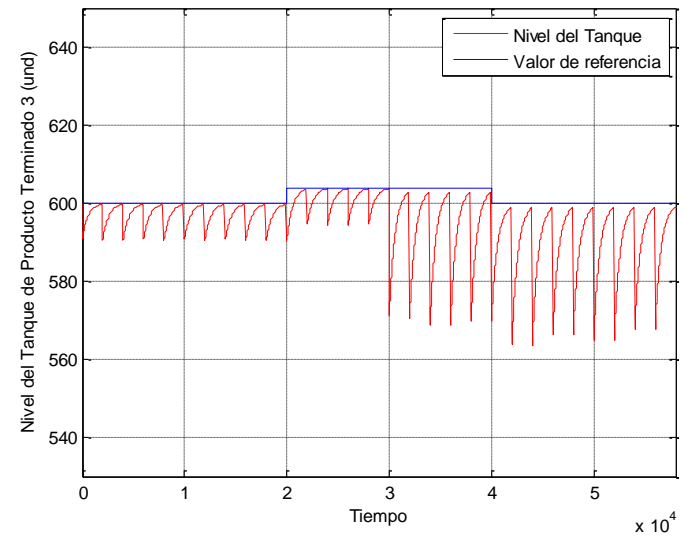


Ilustración 326 Variable PT 3 con PID en el proceso FFS – D3 – P2.

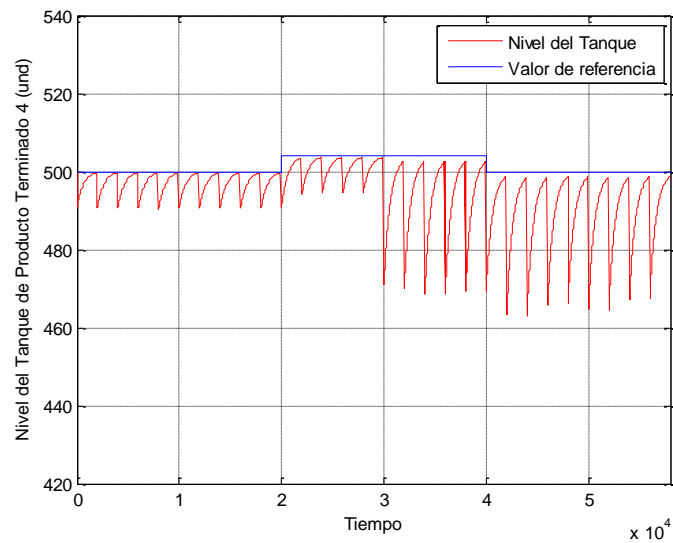


Ilustración 327 Variable PT 4 con PID en el proceso FFS – D3 – P2.

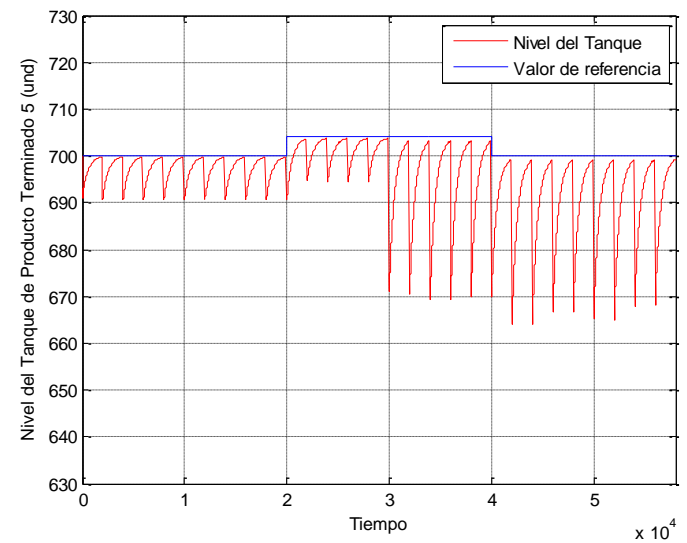


Ilustración 328 Variable PT 5 con PID en el proceso FFS – D3 – P2.

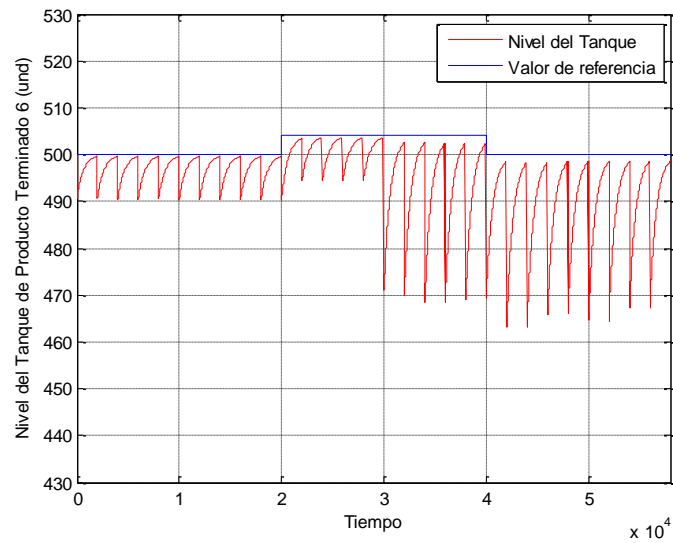


Ilustración 329 Variable PT 6 con PID en el proceso FFS – D3 – P2.

## ANEXO 21. IMPLEMENTACIÓN PID AL PROCESO FFS CON D3 – P3.

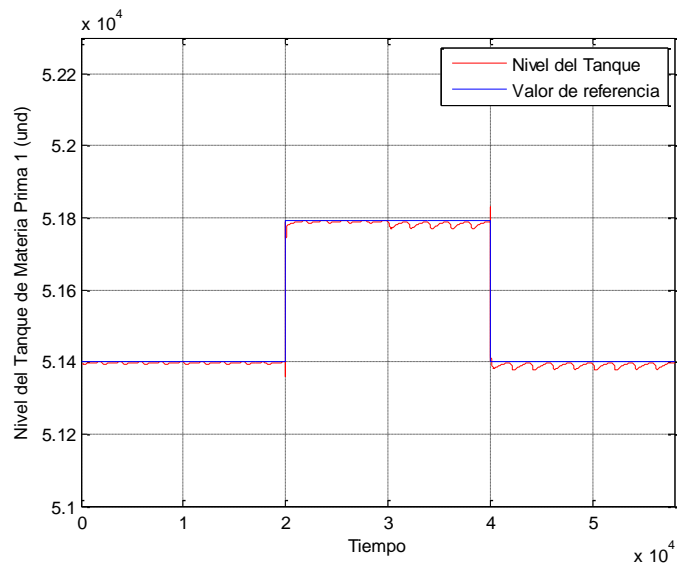


Ilustración 330 Variable MP 1 con PID en el proceso FFS – D3 – P3.

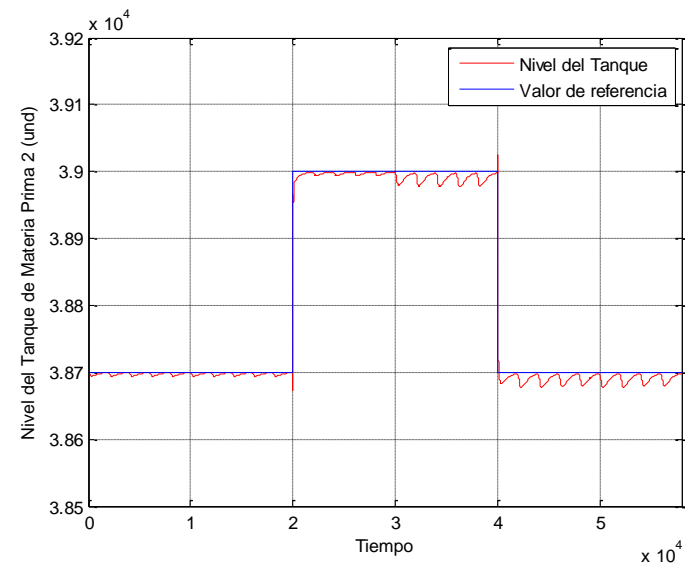


Ilustración 331 Variable MP 2 con PID en el proceso FFS – D3 – P3.

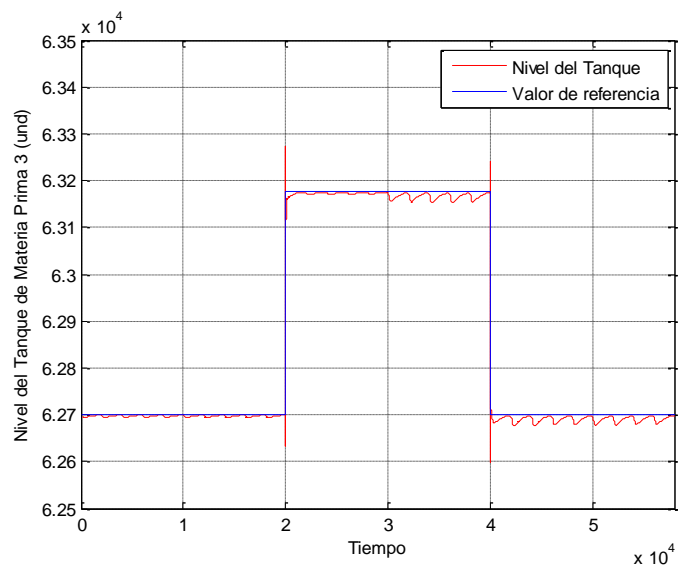


Ilustración 332 Variable MP 3 con PID en el proceso FFS – D3 – P3.

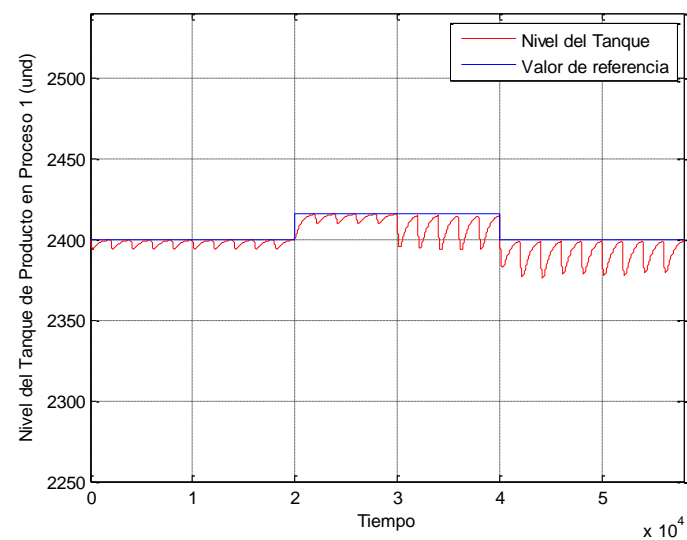


Ilustración 333 Variable PP 1 con PID en el proceso FFS – D3 – P3.

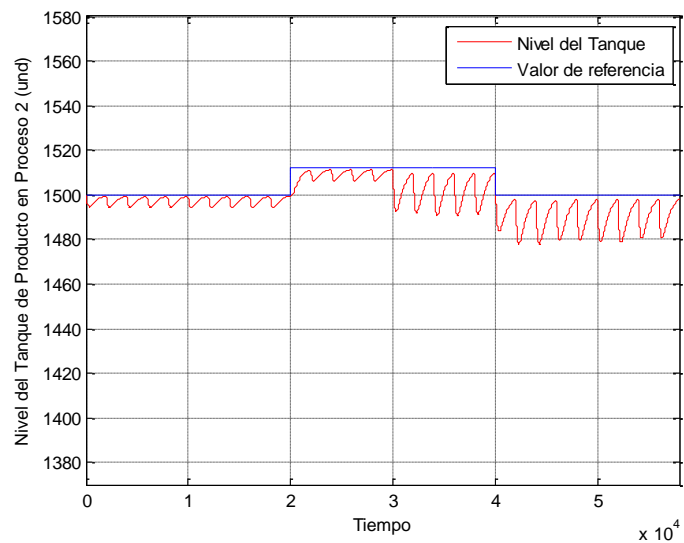


Ilustración 334 Variable PP 2 con PID en el proceso FFS – D3 – P3.

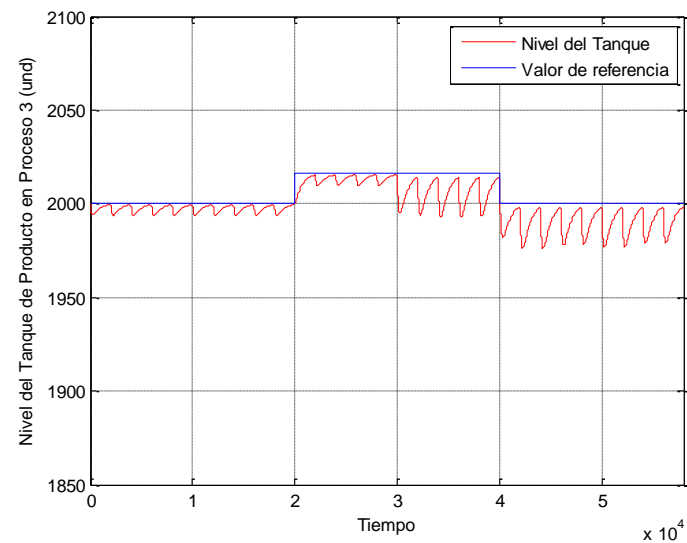


Ilustración 335 Variable PP 3 con PID en el proceso FFS – D3 – P3.

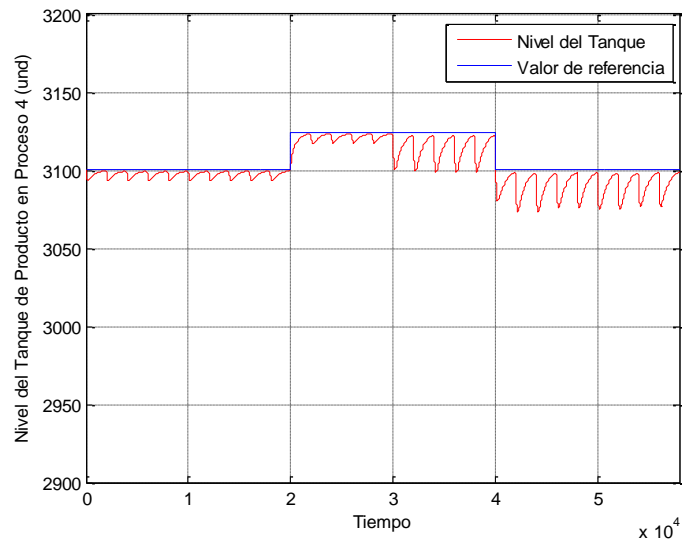


Ilustración 336 Variable PP 4 con PID en el proceso FFS – D3 – P3.

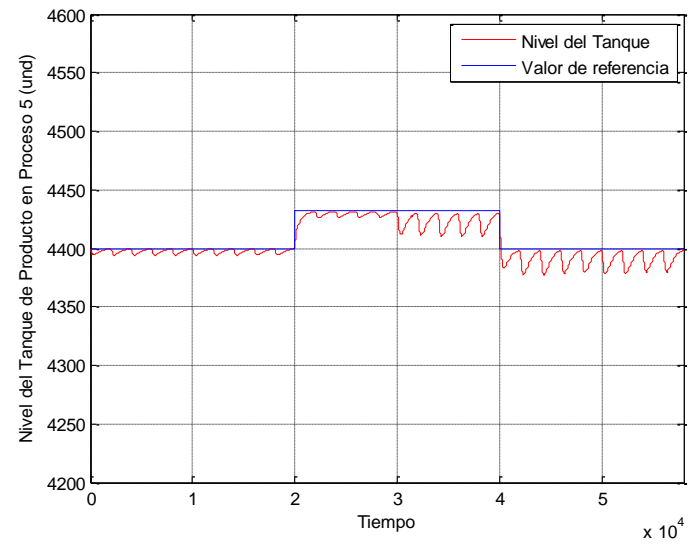


Ilustración 337 Variable PP 5 con PID en el proceso FFS – D3 – P3.

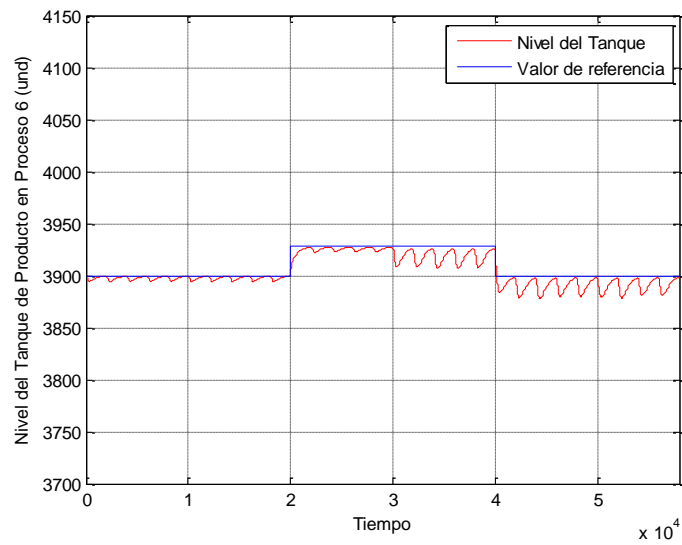


Ilustración 338 Variable PP 6 con PID en el proceso FFS – D3 – P3.

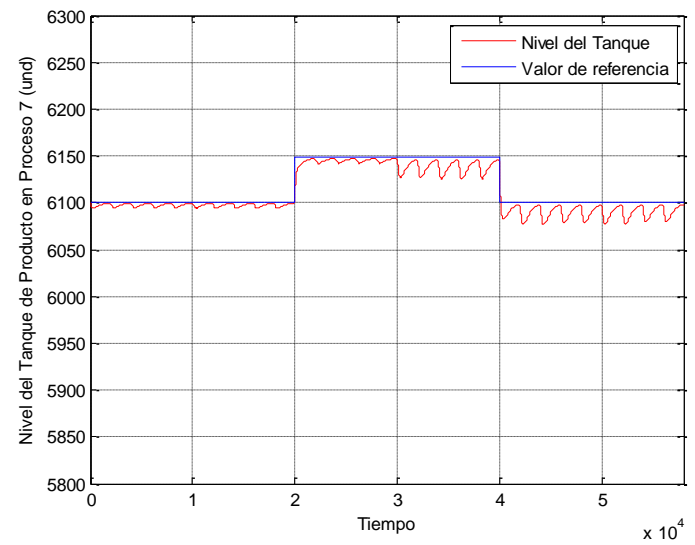


Ilustración 339 Variable PP 7 con PID en el proceso FFS – D3 – P3.



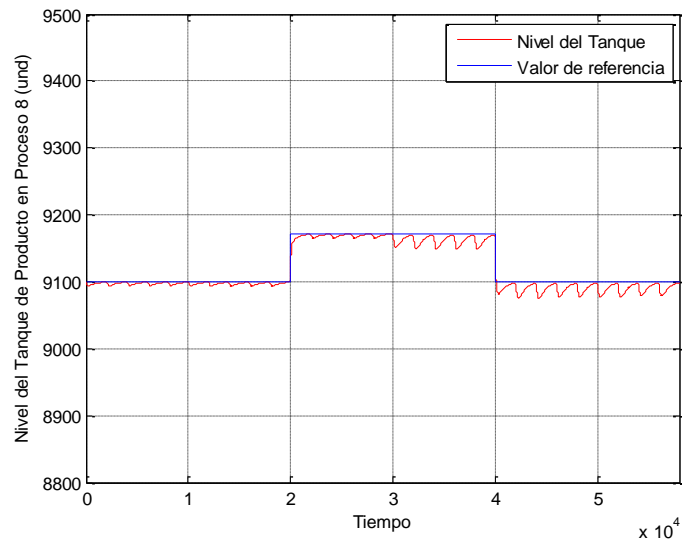


Ilustración 340 Variable PP 8 con PID en el proceso FFS – D3 – P3.

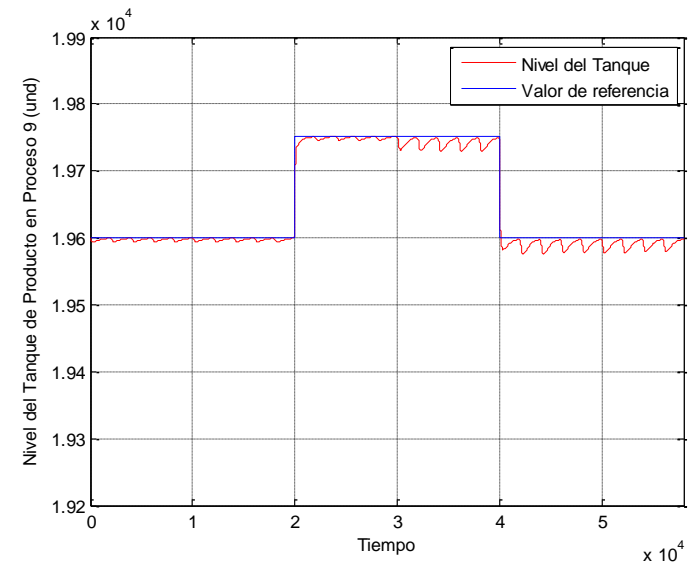


Ilustración 341 Variable PP 9 con PID en el proceso FFS – D3 – P3.

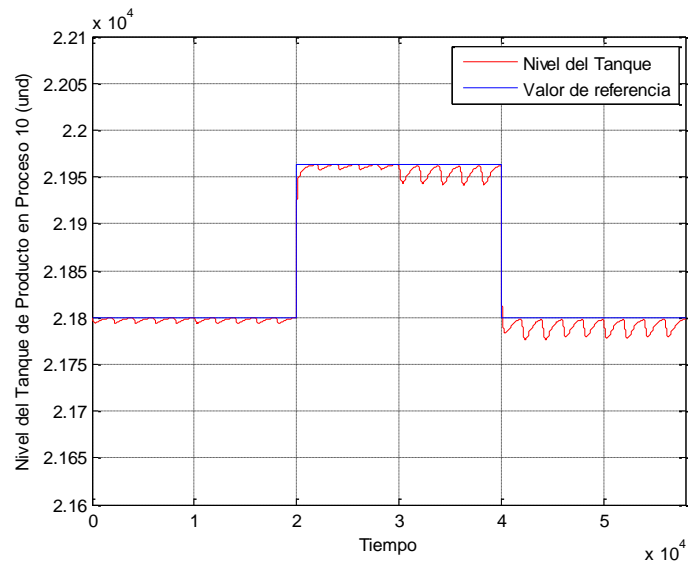


Ilustración 342 Variable PP 10 con PID en el proceso FFS – D3 – P3.

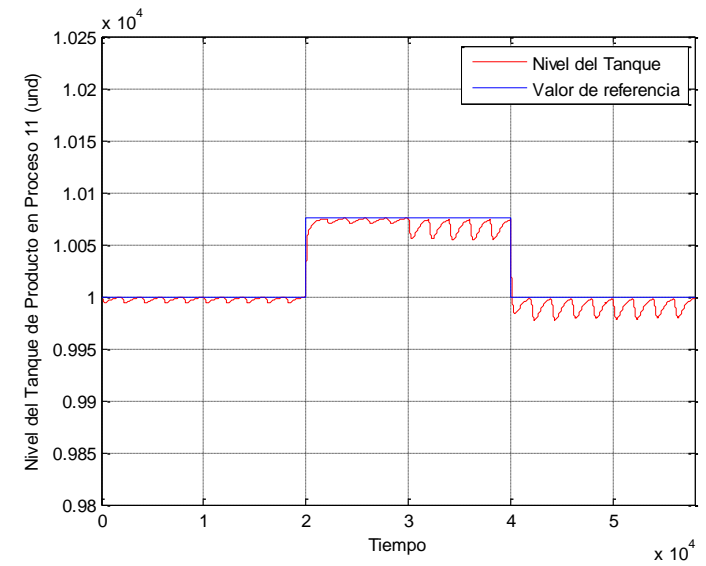


Ilustración 343 Variable PP 11 con PID en el proceso FFS – D3 – P3.

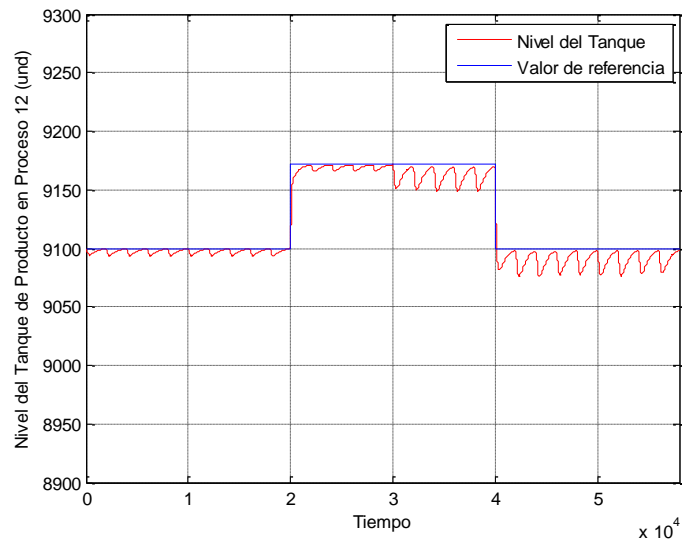


Ilustración 344 Variable PP 12 con PID en el proceso FFS – D3 – P3.

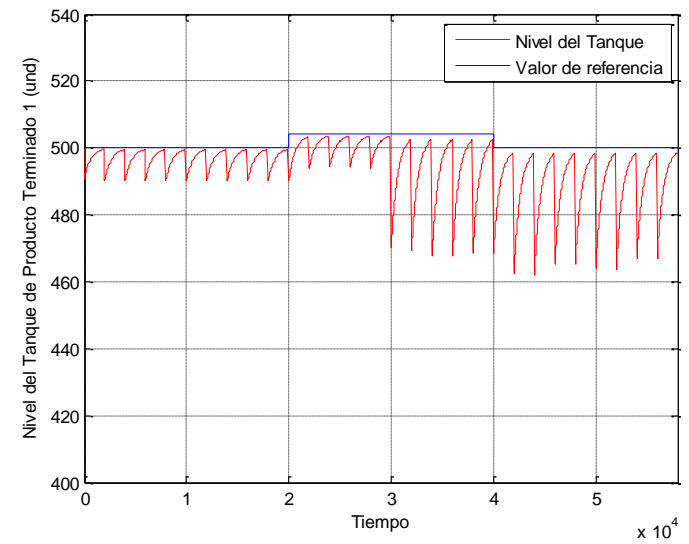


Ilustración 345 Variable PT 1 con PID en el proceso FFS – D3 – P3.

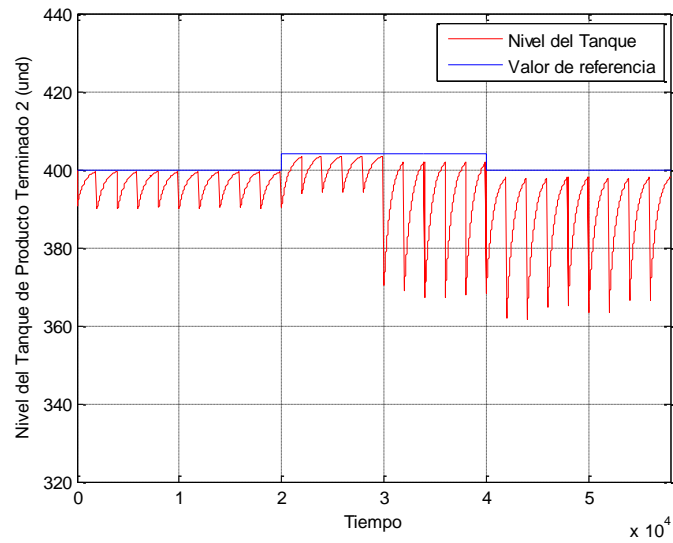


Ilustración 346 Variable PT 2 con PID en el proceso FFS – D3 – P3.

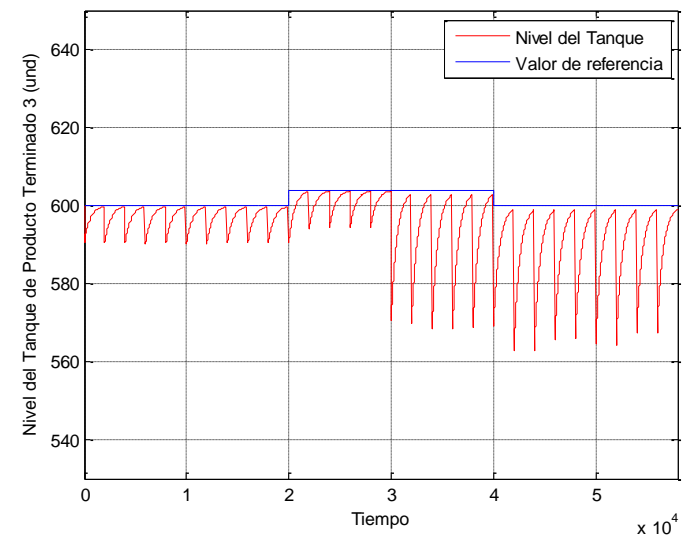


Ilustración 347 Variable PT 3 con PID en el proceso FFS – D3 – P3.

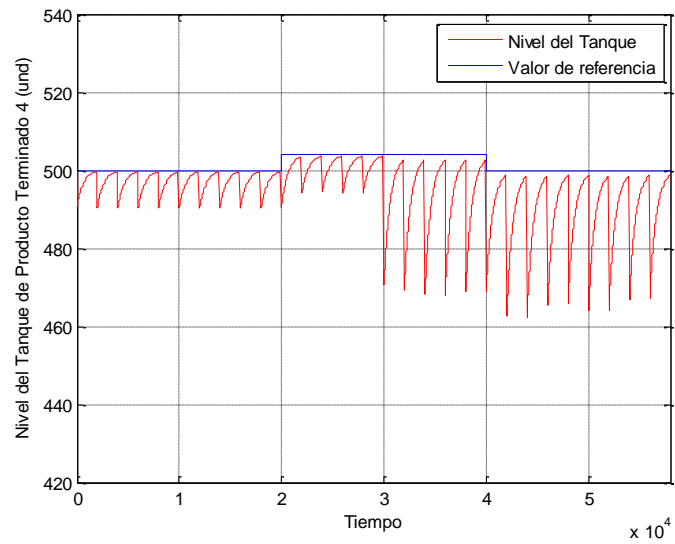


Ilustración 348 Variable PT 4 con PID en el proceso FFS – D3 – P3.

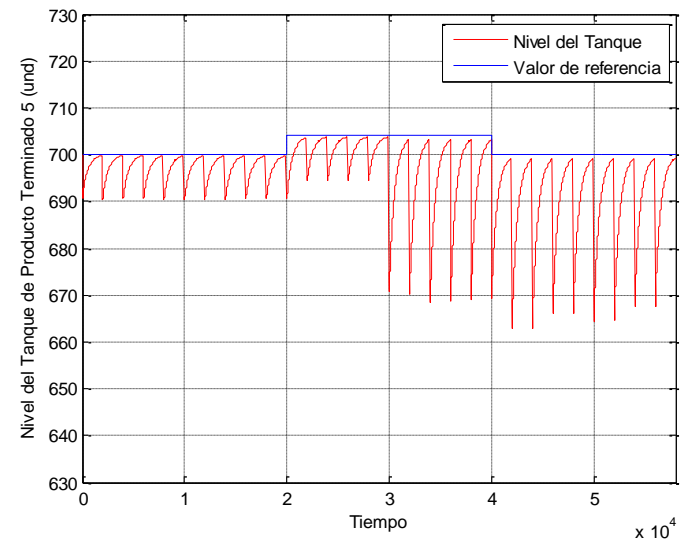


Ilustración 349 Variable PT 5 con PID en el proceso FFS – D3 – P3.

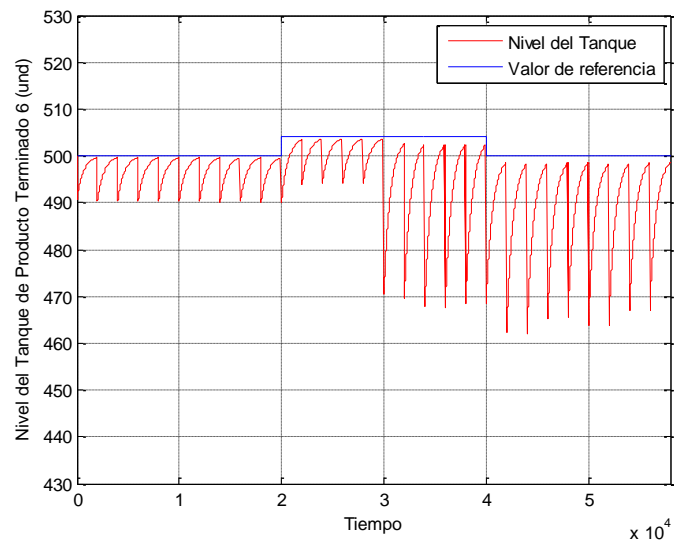


Ilustración 350 Variable PT 6 con PID en el proceso FFS – D3 – P3.

ANEXO 22. IMPLEMENTACIÓN DMC AL PROCESO JS CON D1 – P1.

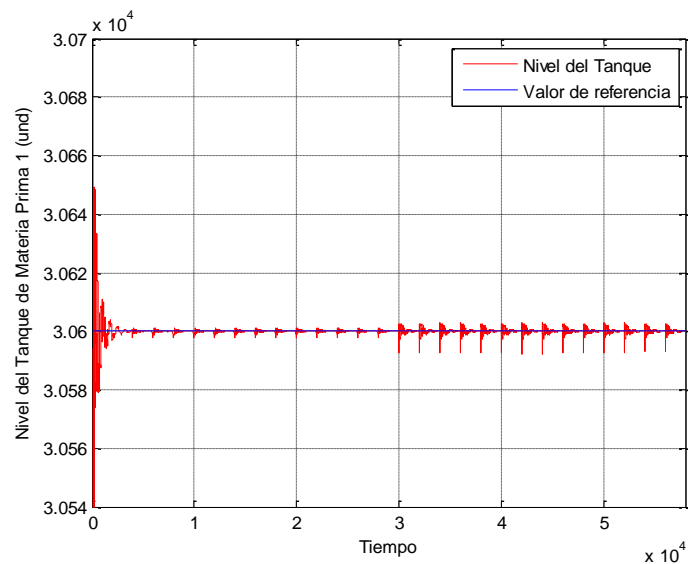


Ilustración 351 Variable MP 1 con DMC en el proceso JS – D1 – P1.

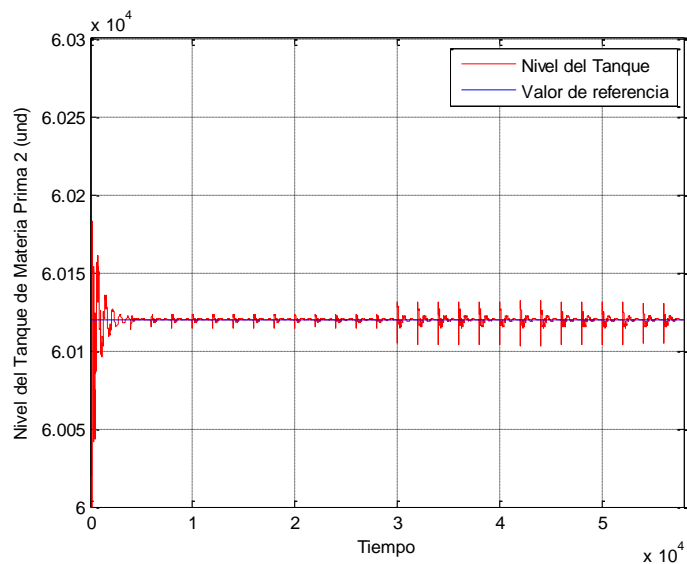


Ilustración 352 Variable MP 2 con DMC en el proceso JS – D1 – P1.

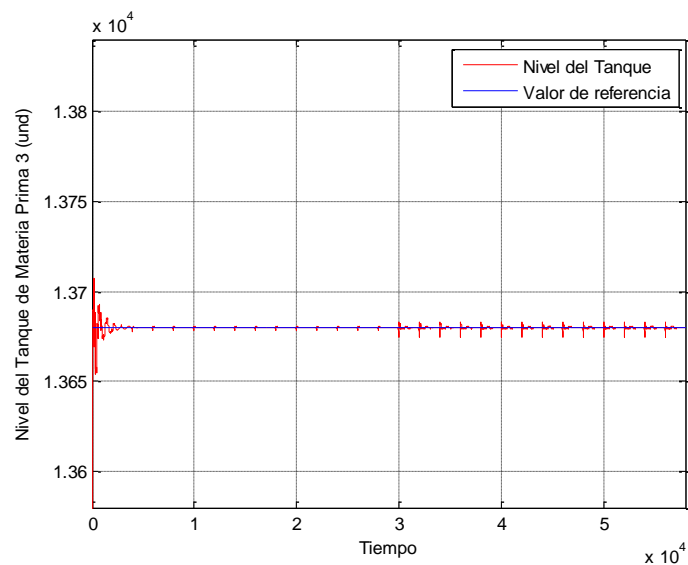


Ilustración 353 Variable MP 3 con DMC en el proceso JS – D1 – P1.

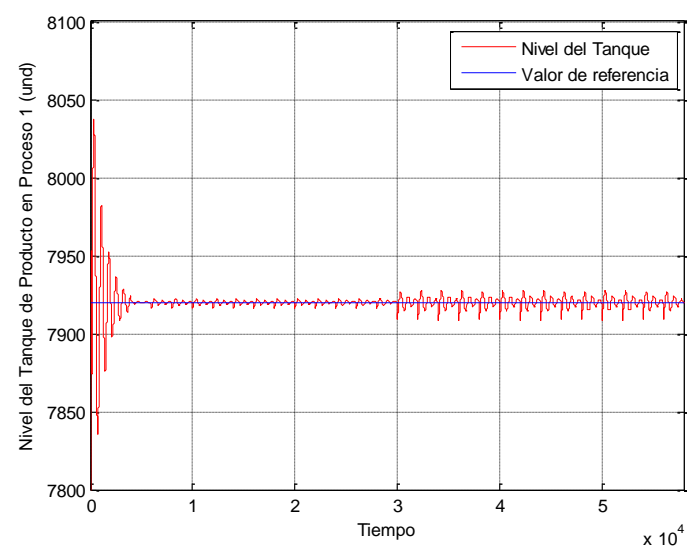


Ilustración 354 Variable PP 1 con DMC en el proceso JS – D1 – P1.

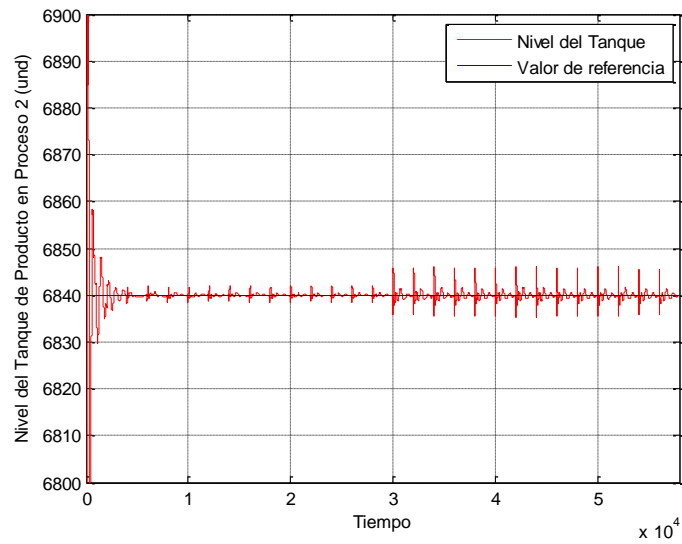


Ilustración 355 Variable PP 2 con DMC en el proceso JS – D1 – P1.

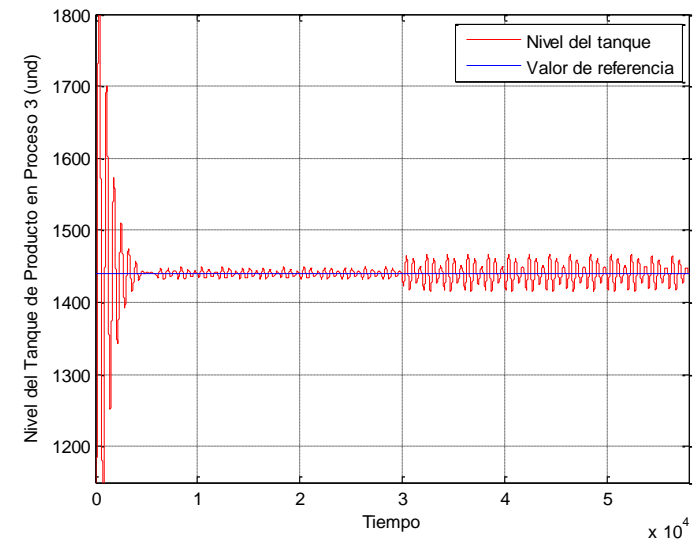


Ilustración 356 Variable PP 3 con DMC en el proceso JS – D1 – P1.

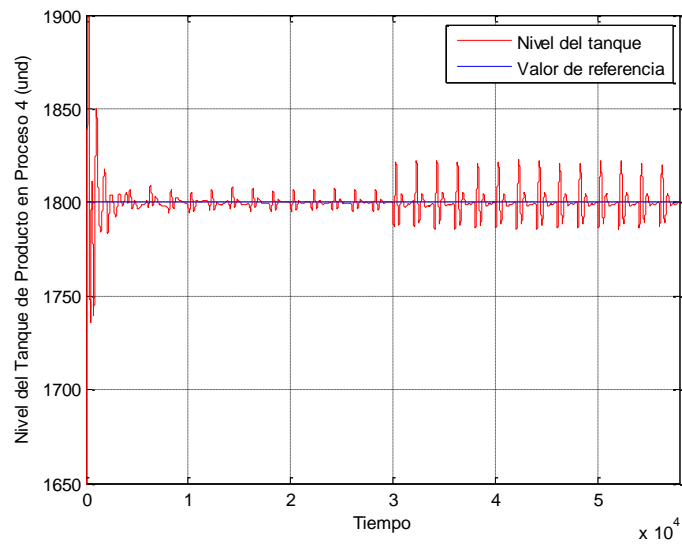


Ilustración 357 Variable PP 4 con DMC en el proceso JS – D1 – P1.

ANEXO 23. IMPLEMENTACIÓN DMC AL PROCESO JS CON D1 – P2.

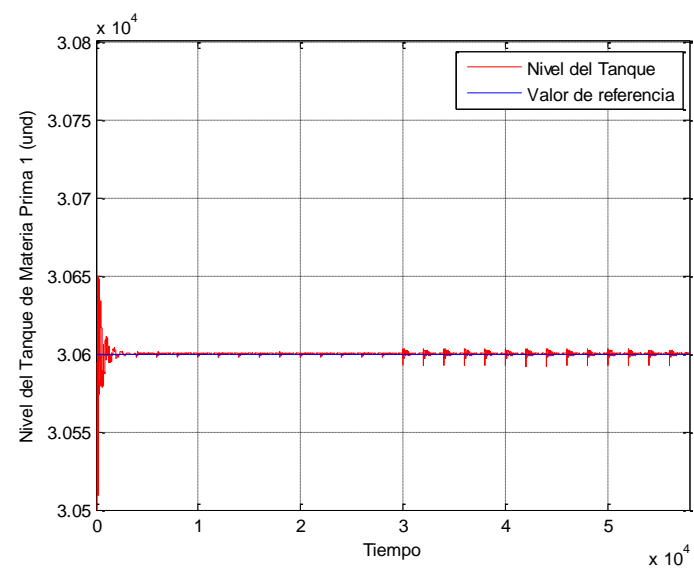


Ilustración 358 Variable MP1 con DMC en el proceso JS – D1 – P2.

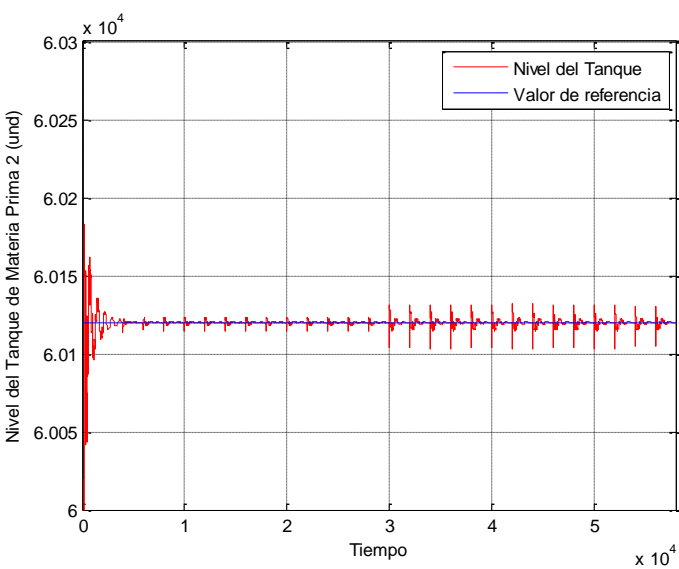


Ilustración 359 Variable MP 2 con DMC en el proceso JS – D1 – P2.

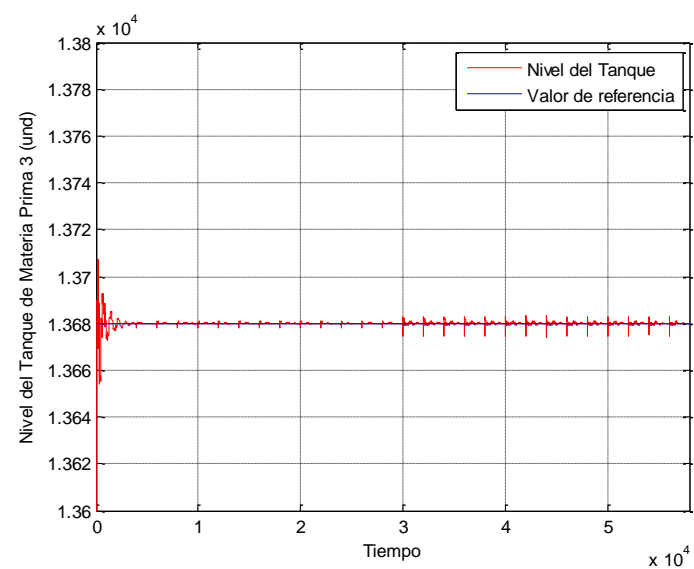


Ilustración 360 Variable MP 3 con DMC en el proceso JS – D1 – P2.

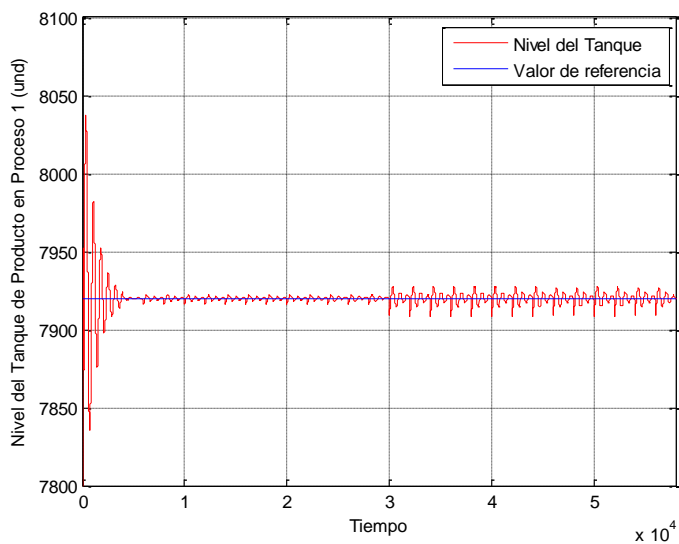


Ilustración 361 Variable PP 1 con DMC en el proceso JS – D1 – P2.

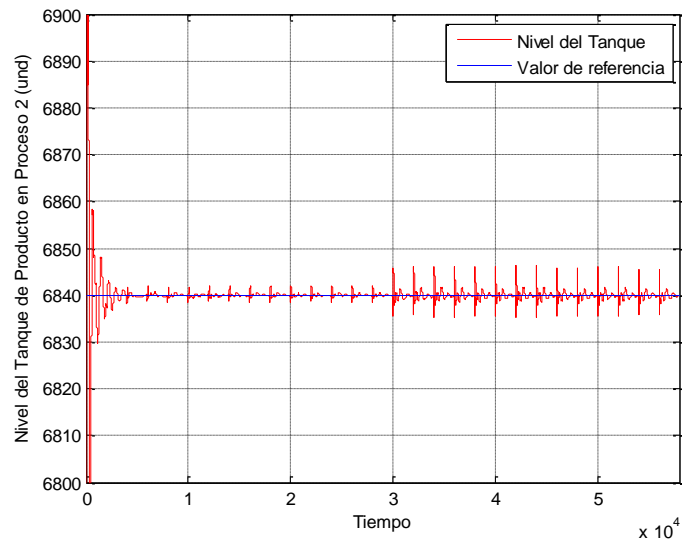


Ilustración 362 Variable PP 2 con DMC en el proceso JS - D1 - P2.

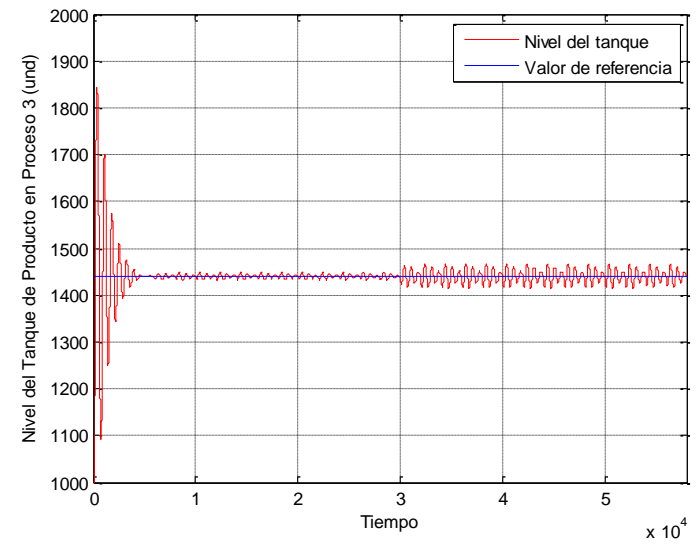


Ilustración 363 Variable PP 3 con DMC en el proceso JS - D1 - P2.

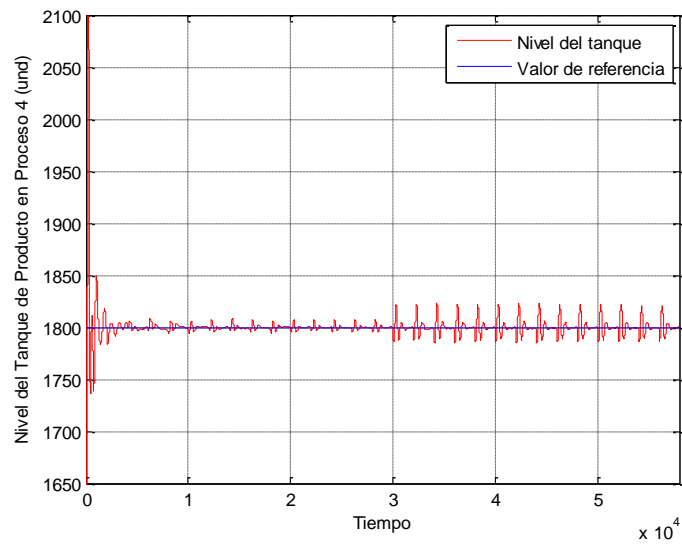


Ilustración 364 Variable PP 4 con DMC en el proceso JS - D1 - P2.

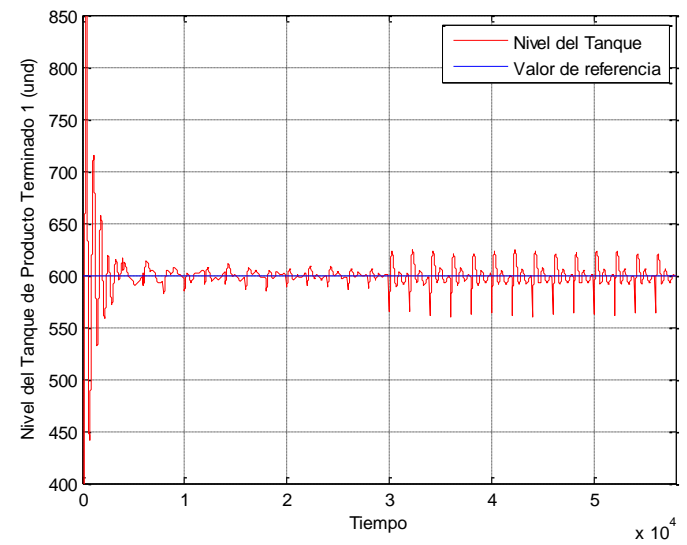


Ilustración 365 Variable PT 1 con DMC en el proceso JS - D1 - P2.

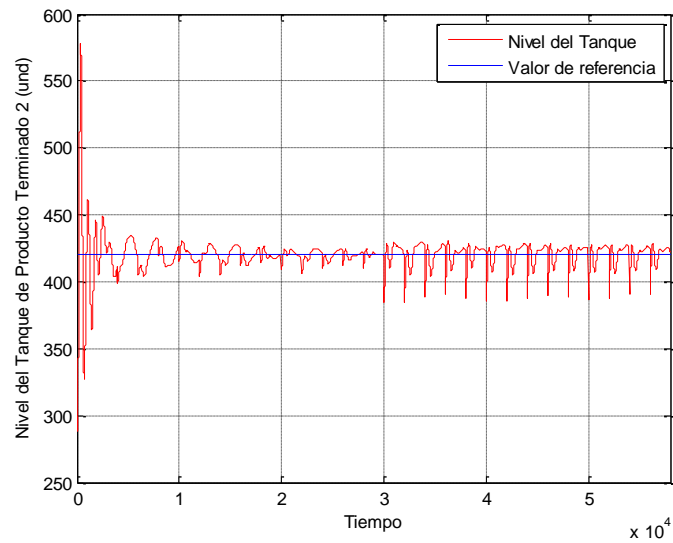


Ilustración 366 Variable PT 2 con DMC en el proceso JS – D1 – P2.

#### ANEXO 23. IMPLEMENTACIÓN DMC AL PROCESO JS CON D1 – P3.

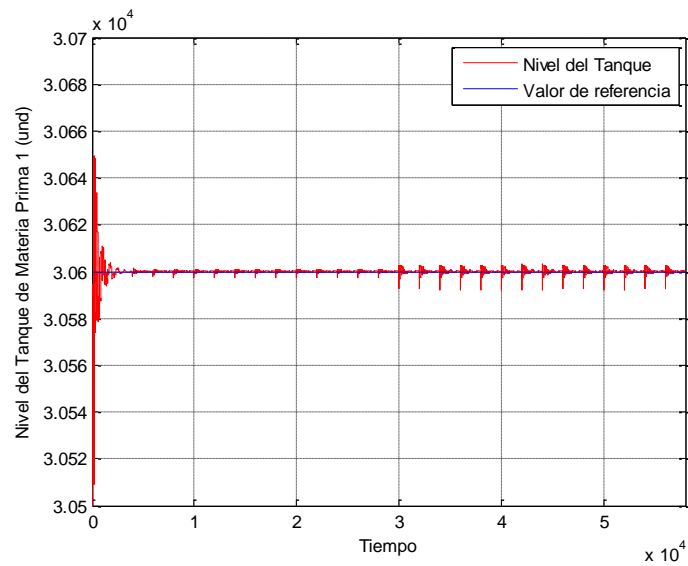


Ilustración 367 Variable MP 1 con DMC en el proceso JS – D1 – P3.

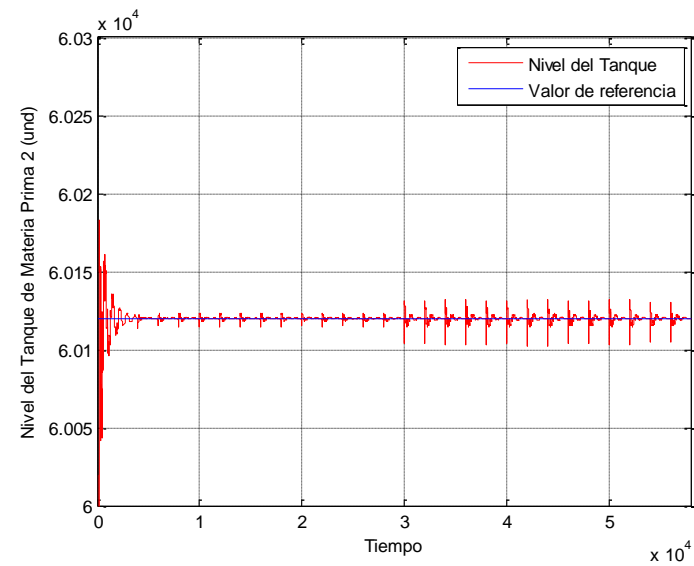


Ilustración 368 Variable MP 2 con DMC en el proceso JS – D1 – P3.



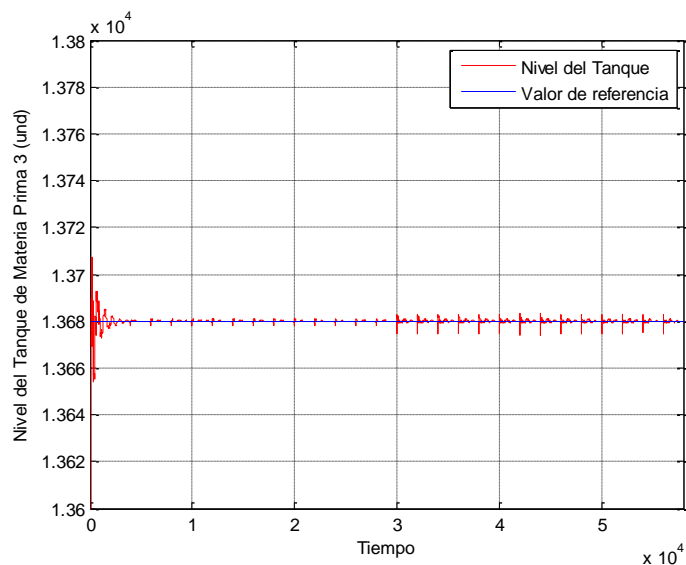


Ilustración 369 Variable MP 3 con DMC en el proceso JS – D1 – P3.

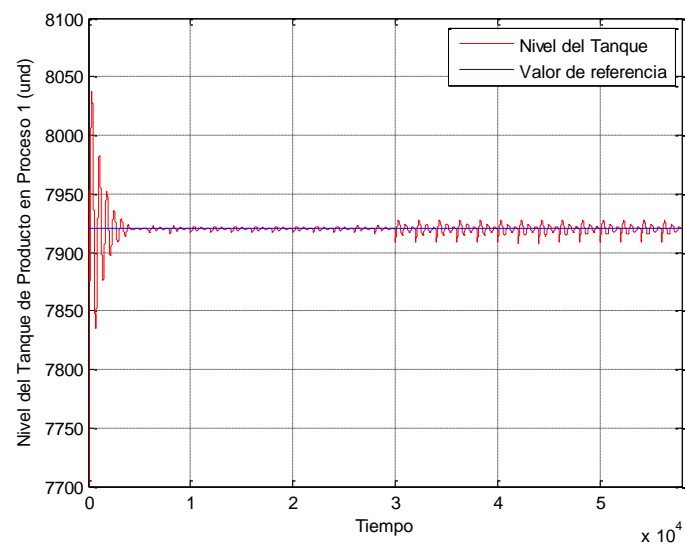


Ilustración 370 Variable PP 1 con DMC en el proceso JS – D1 – P3.

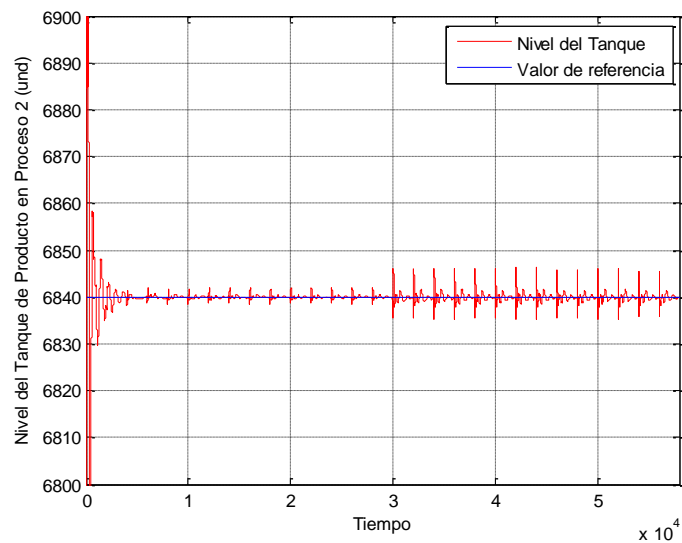


Ilustración 371 Variable PP 2 con DMC en el proceso JS – D1 – P3.

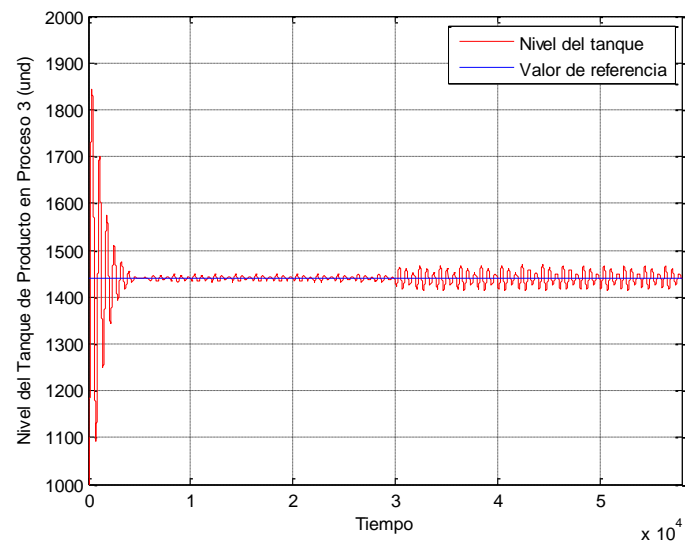


Ilustración 372 Variable PP 3 con DMC en el proceso JS – D1 – P3.

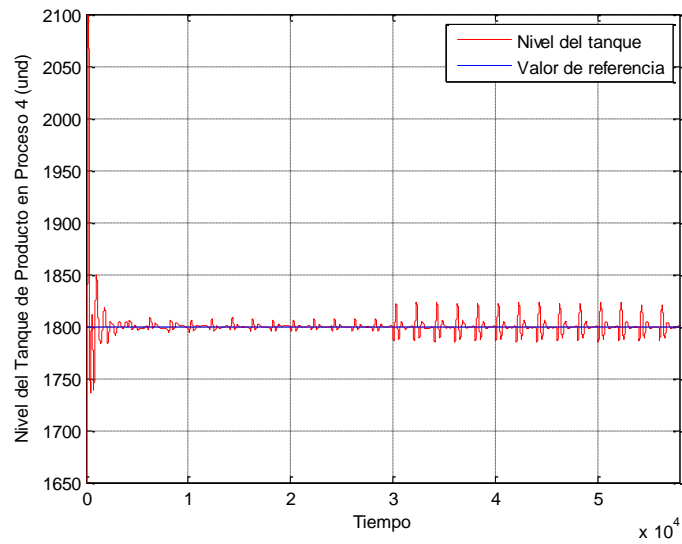


Ilustración 373 Variable PP 4 con DMC en el proceso JS – D1 – P3.

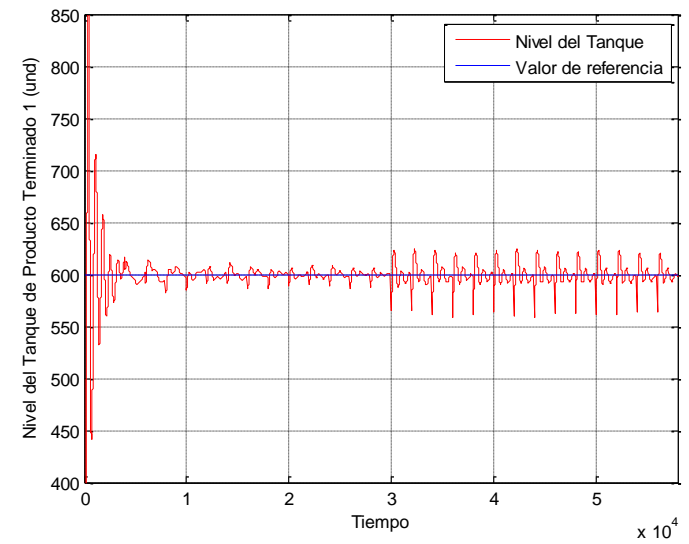


Ilustración 374 Variable PT 1 con DMC en el proceso JS – D1 – P3.

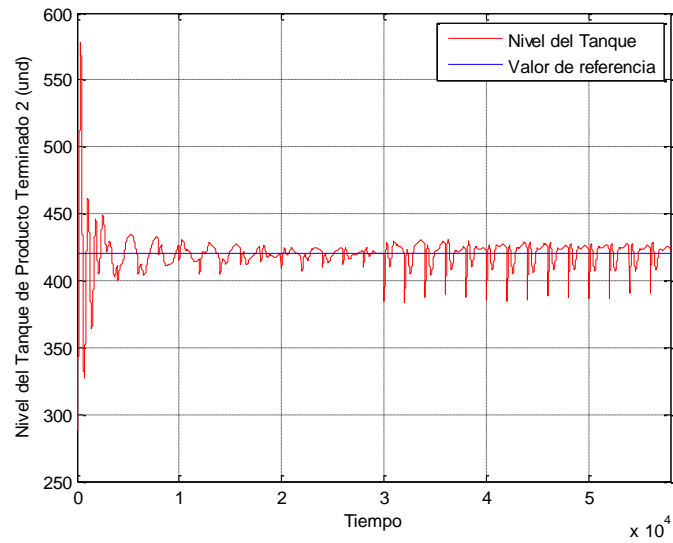


Ilustración 375 Variable PT 2 con DMC en el proceso JS – D1 – P3.

ANEXO 24. IMPLEMENTACIÓN DMC AL PROCESO JS CON D2 – P1.

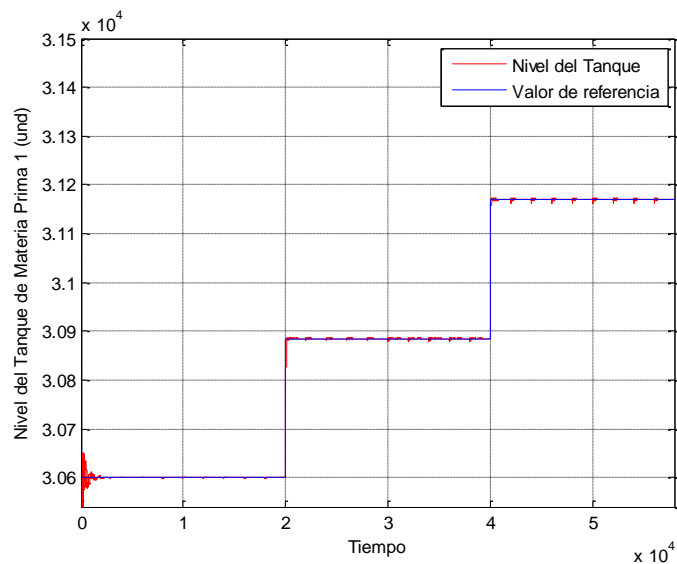


Ilustración 376 Variable MP 1 con DMC en el proceso JS – D2 – P1.

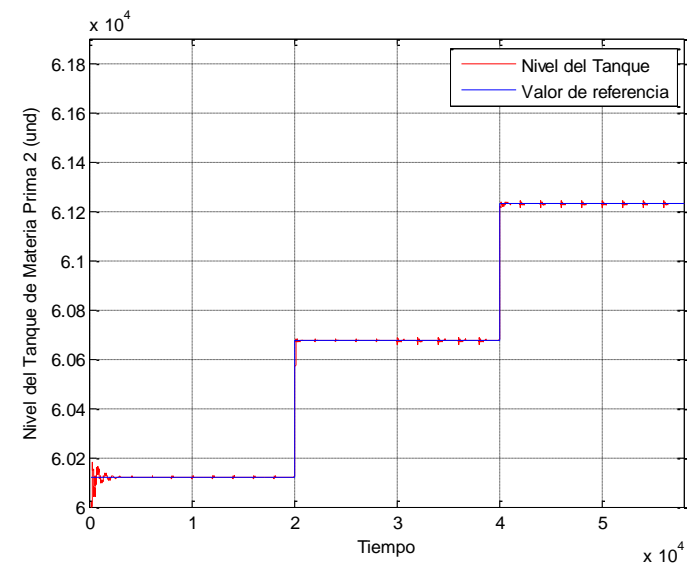


Ilustración 377 Variable MP 2 con DMC en el proceso JS – D2 – P1.

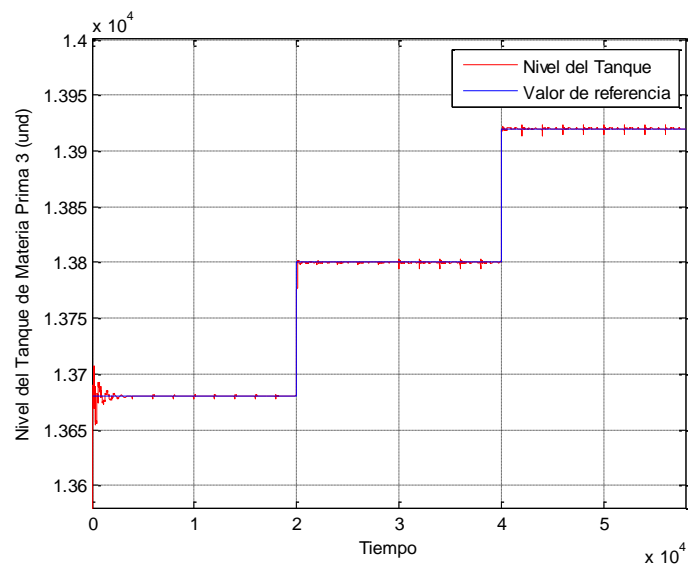


Ilustración 378 Variable MP 3 con DMC en el proceso JS – D2 – P1.

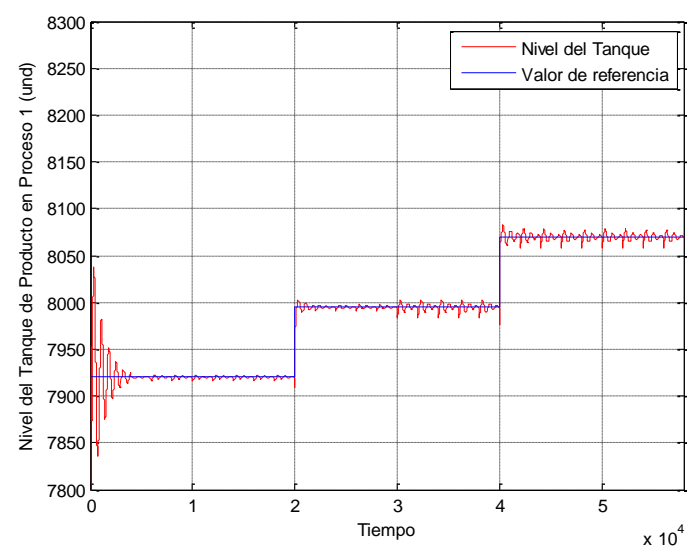


Ilustración 379 Variable PP 1 con DMC en el proceso JS – D2 – P1.

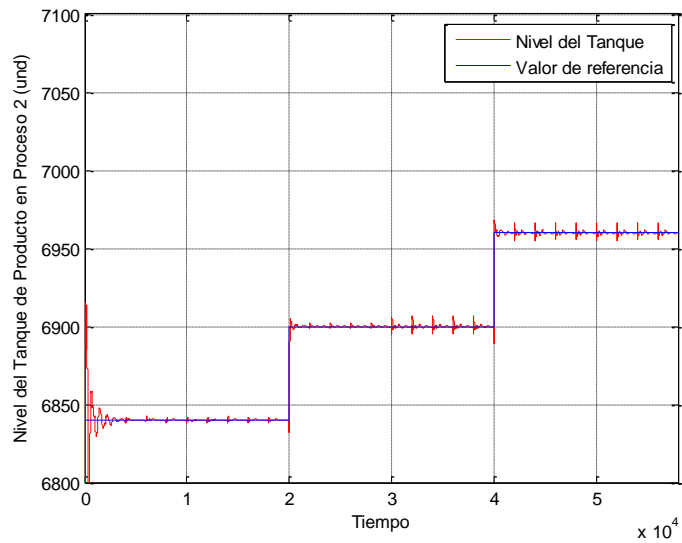


Ilustración 380 Variable PP 2 con DMC en el proceso JS – D2 – P1.

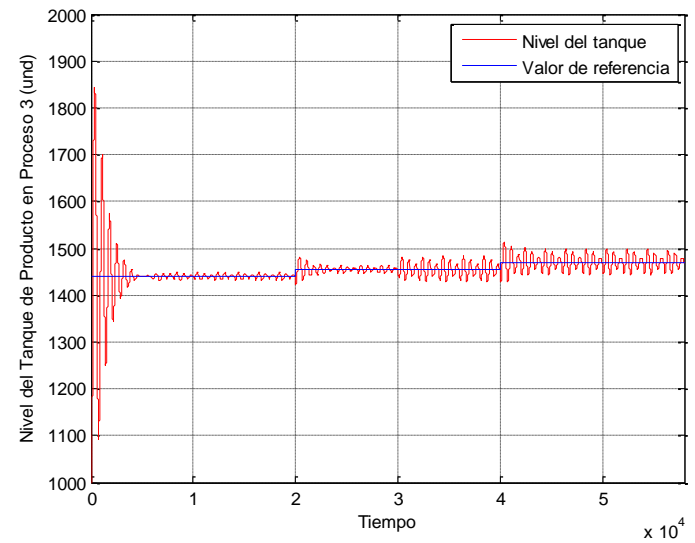


Ilustración 381 Variable PP 3 con DMC en el proceso JS – D2 – P1.

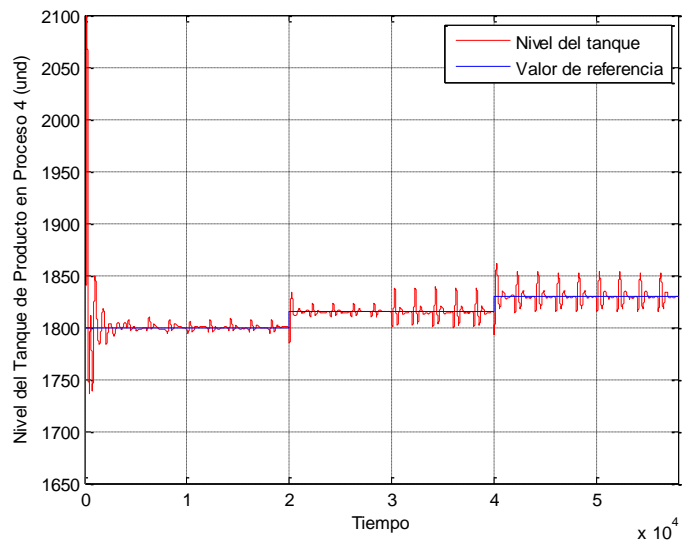


Ilustración 382 Variable PP 4 con DMC en el proceso JS – D2 – P1.

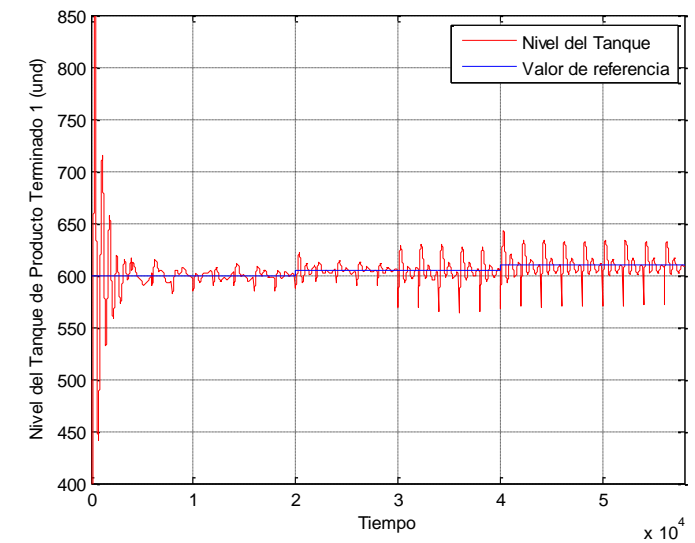


Ilustración 383 Variable PT 1 con DMC en el proceso JS – D2 – P1.

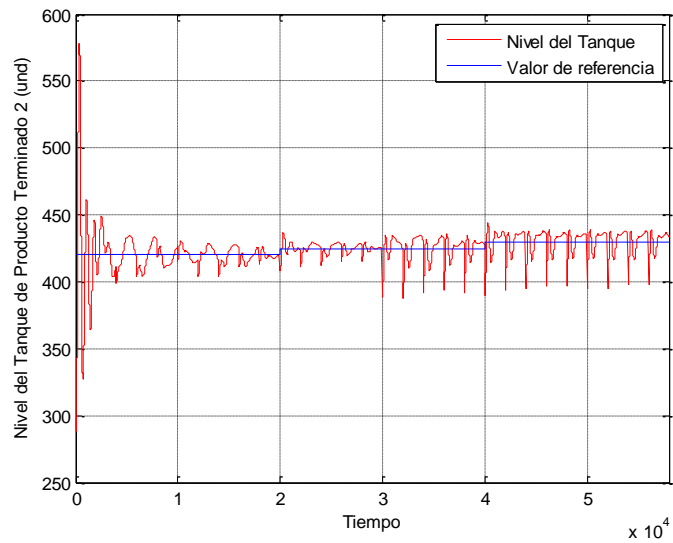


Ilustración 384 Variable PT 2 con DMC en el proceso JS – D2 – P1.

#### ANEXO 25. IMPLEMENTACIÓN DMC AL PROCESO JS CON D2 – P2.

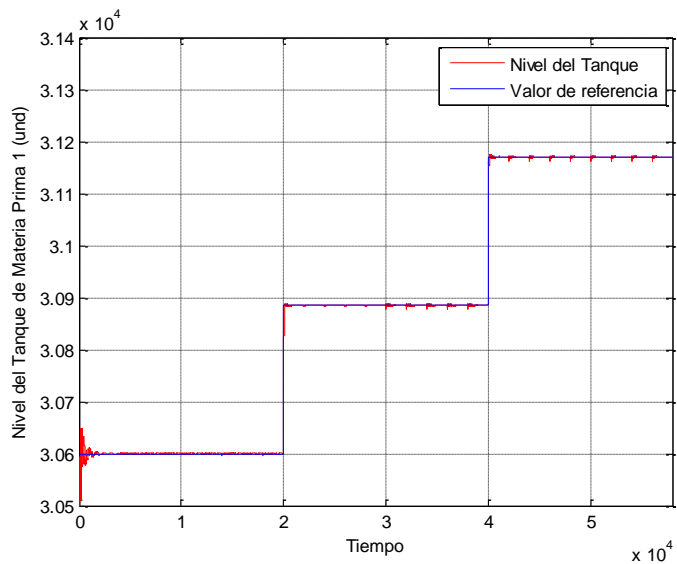


Ilustración 385 Variable MP 1 con DMC en el proceso JS – D2 – P2.

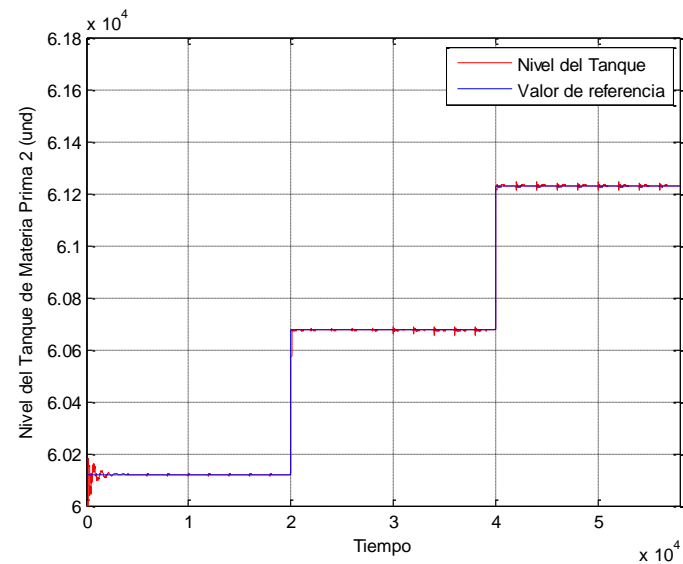


Ilustración 386 Variable MP 2 con DMC en el proceso JS – D2 – P2.

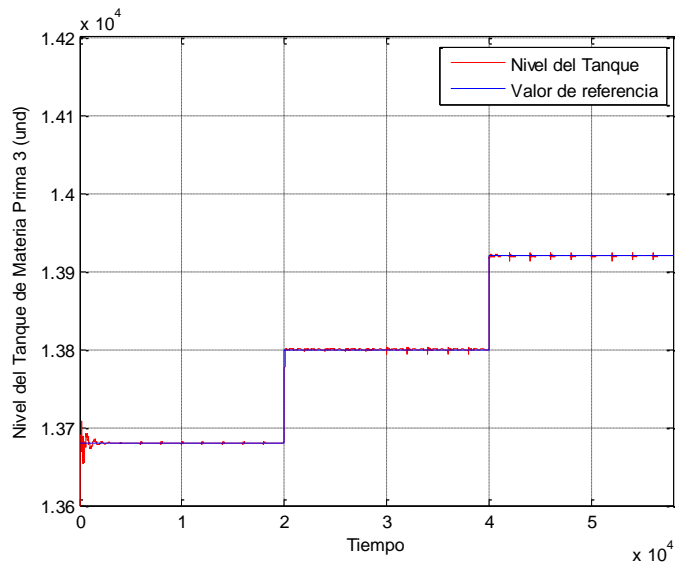


Ilustración 387 Variable MP 3 con DMC en el proceso JS – D2 – P2.

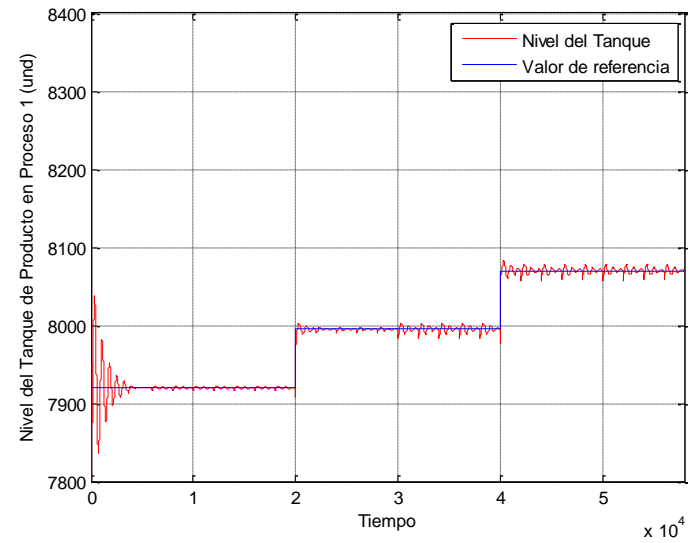


Ilustración 388 Variable PP 1 con DMC en el proceso JS – D2 – P2.

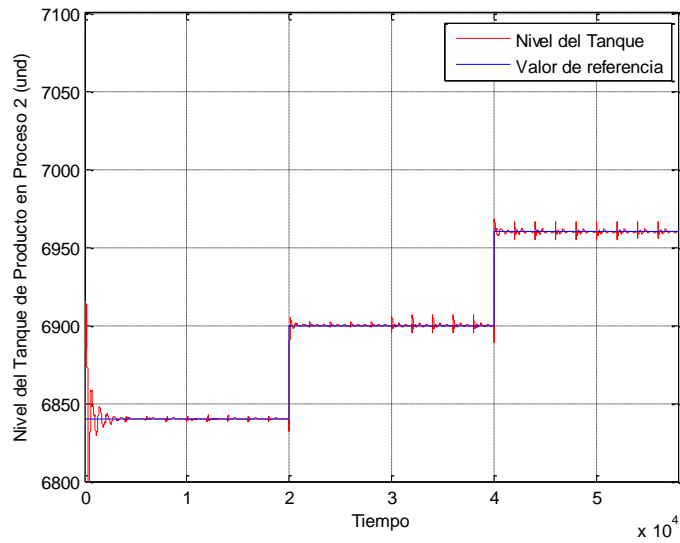


Ilustración 389 Variable PP 2 con DMC en el proceso JS – D2 – P2.

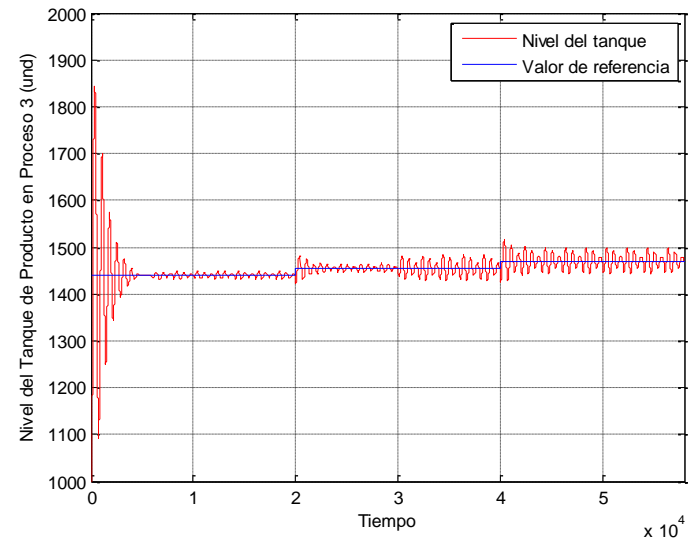


Ilustración 390 Variable PP 3 con DMC en el proceso JS – D2 – P2.

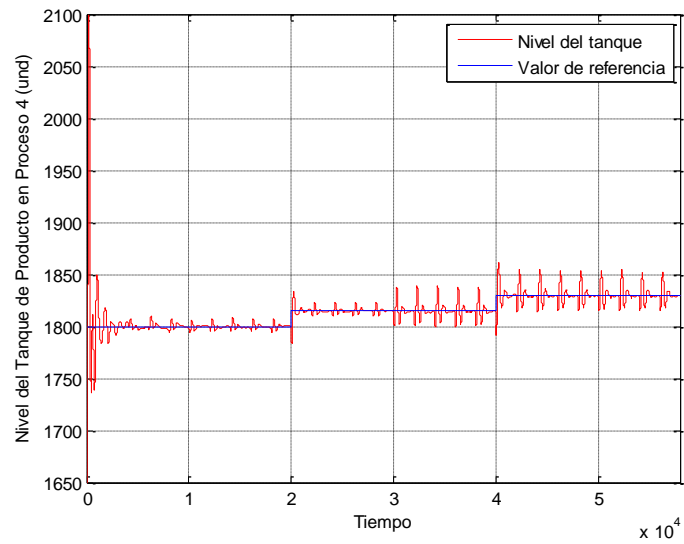


Ilustración 391 Variable PP 4 con DMC en el proceso JS – D2 – P2.

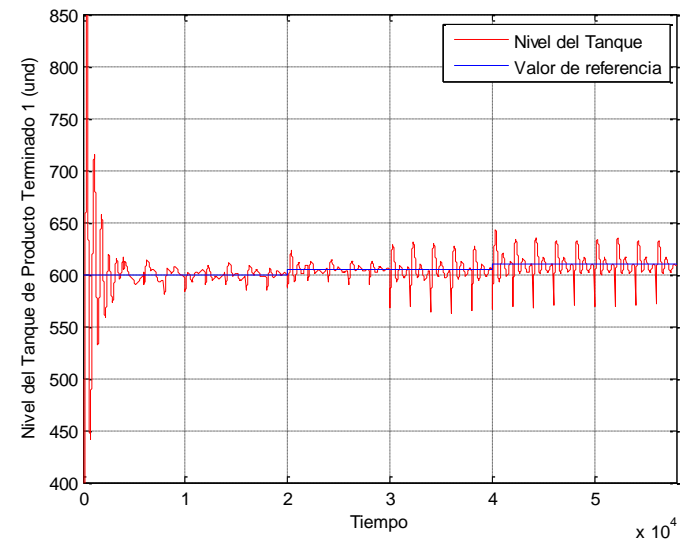


Ilustración 392 Variable PT 1 con DMC en el proceso JS – D2 – P2.

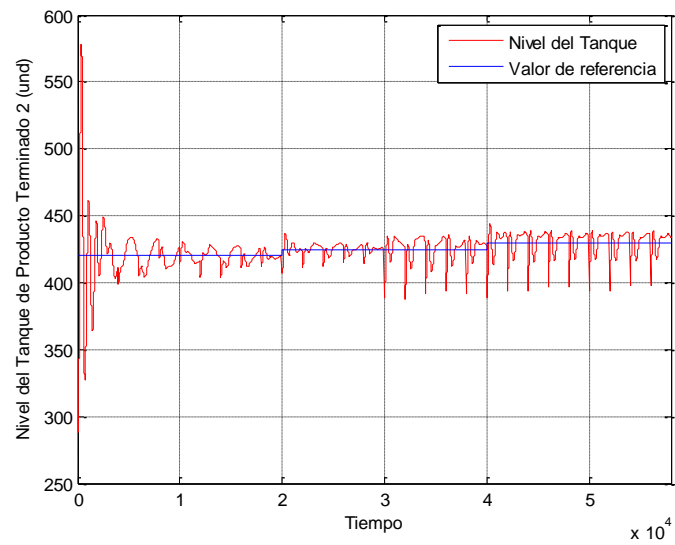


Ilustración 393 Variable PT 2 con DMC en el proceso JS – D2 – P2.

ANEXO 26. IMPLEMENTACIÓN DMC AL PROCESO JS CON D2 – P3.

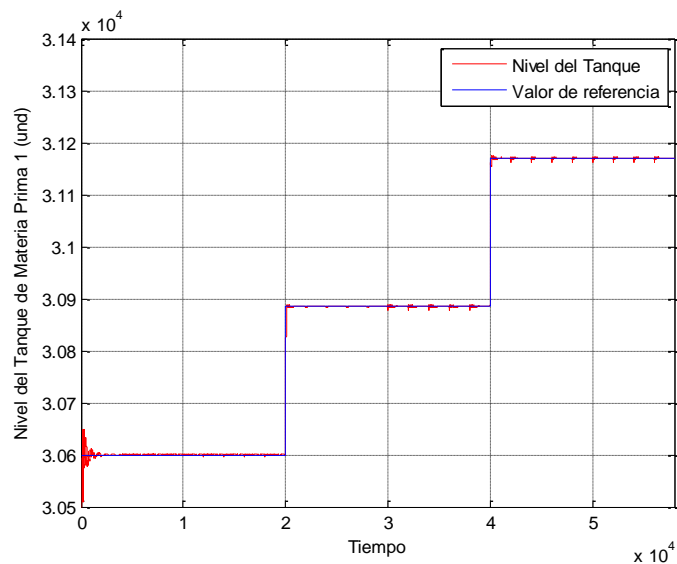


Ilustración 394 Variable MP 1 con DMC en el proceso JS – D2 – P3.

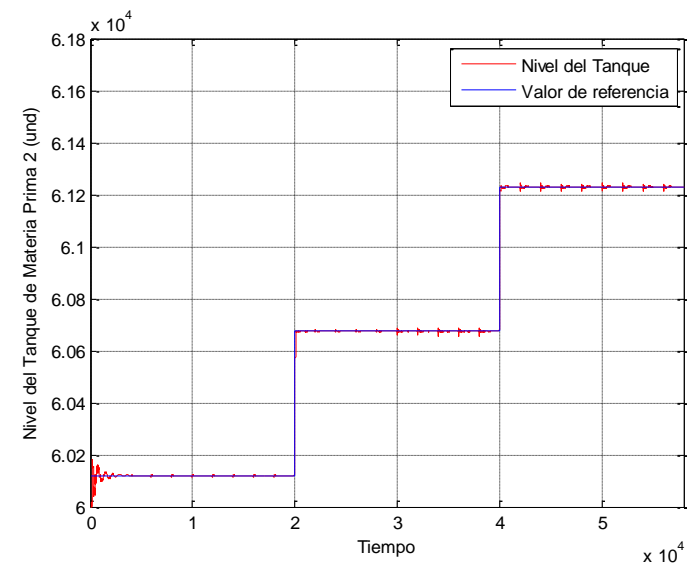


Ilustración 395 Variable MP 2 con DMC en el proceso JS – D2 – P3.

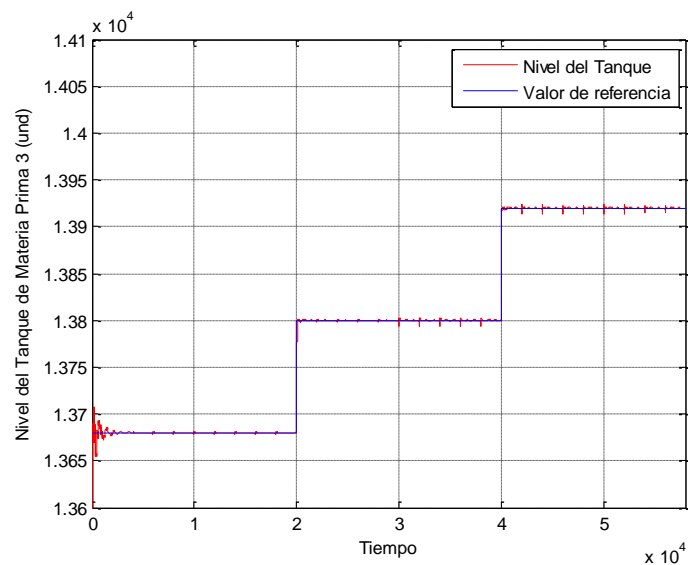


Ilustración 396 Variable MP 3 con DMC en el proceso JS – D2 – P3.

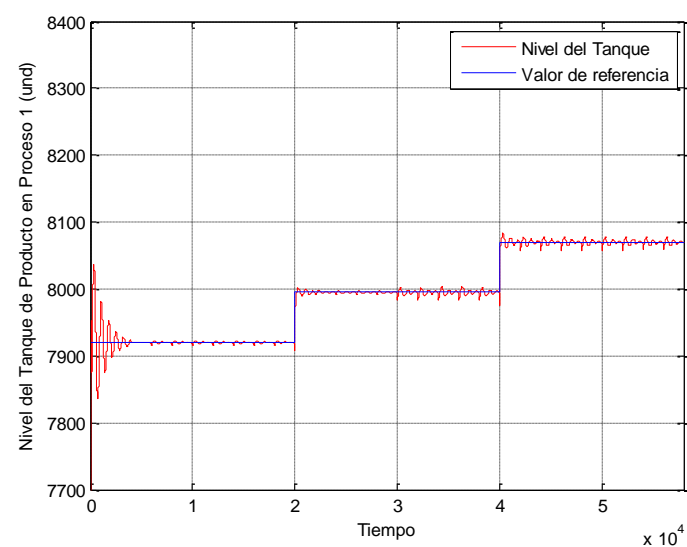


Ilustración 397 Variable PP 1 con DMC en el proceso JS – D2 – P3.



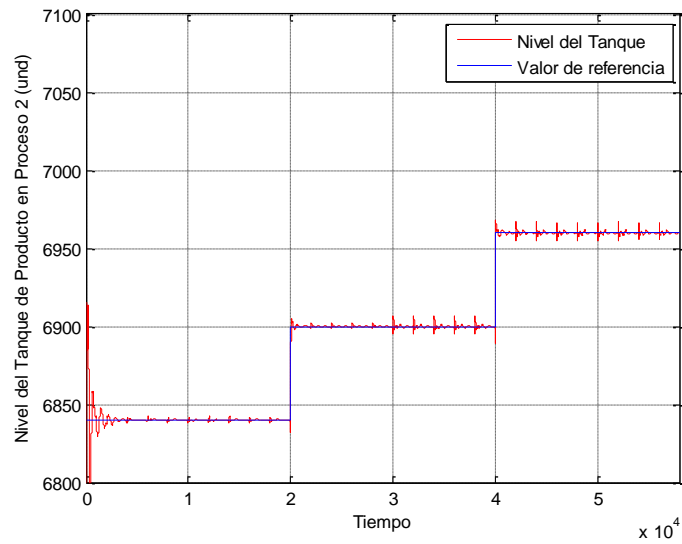


Ilustración 398 Variable PP 2 con DMC en el proceso JS – D2 – P3.

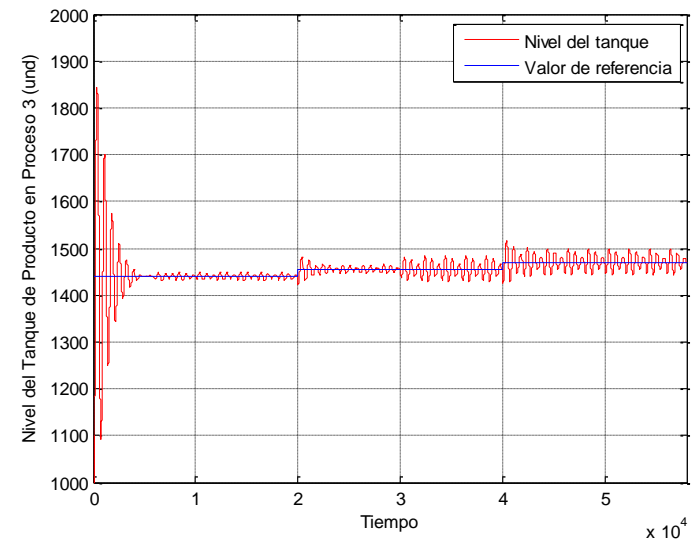


Ilustración 399 Variable PP 3 con DMC en el proceso JS – D2 – P3.

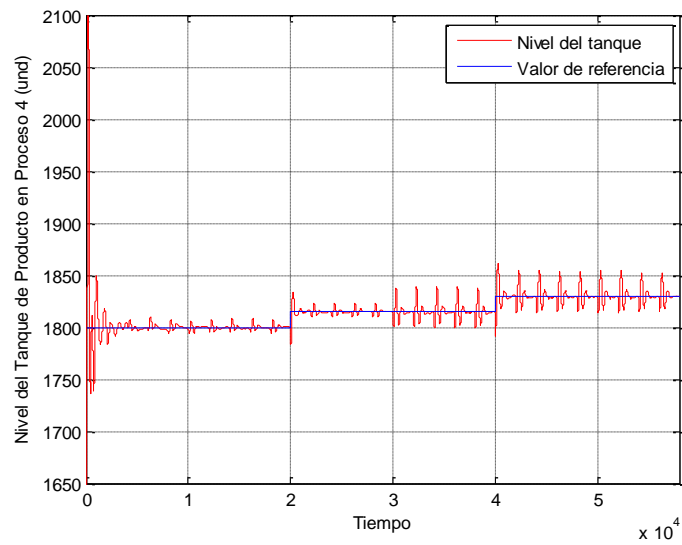


Ilustración 400 Variable PP 4 con DMC en el proceso JS – D2 – P3.

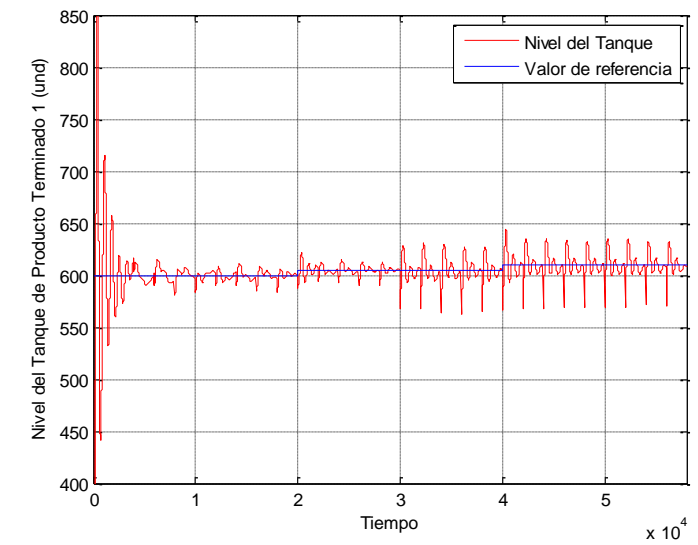


Ilustración 401 Variable PT 1 con DMC en el proceso JS – D2 – P3.

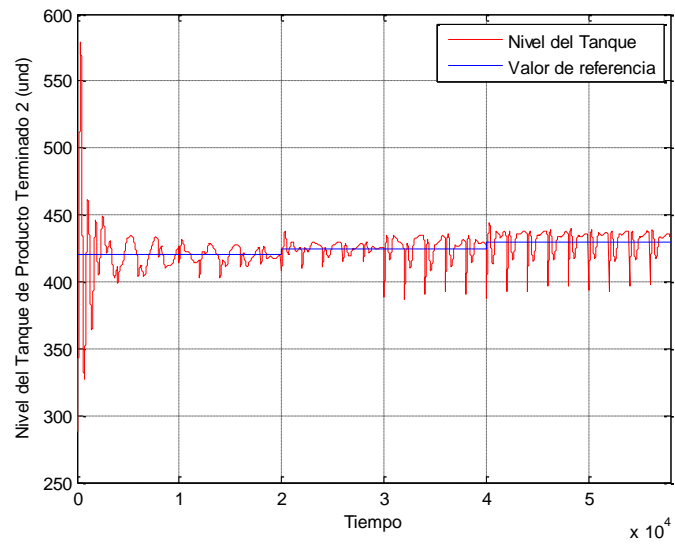


Ilustración 402 Variable PT 2 con DMC en el proceso JS – D2 – P3.

#### ANEXO 27. IMPLEMENTACIÓN DMC AL PROCESO JS CON D3 – P1.

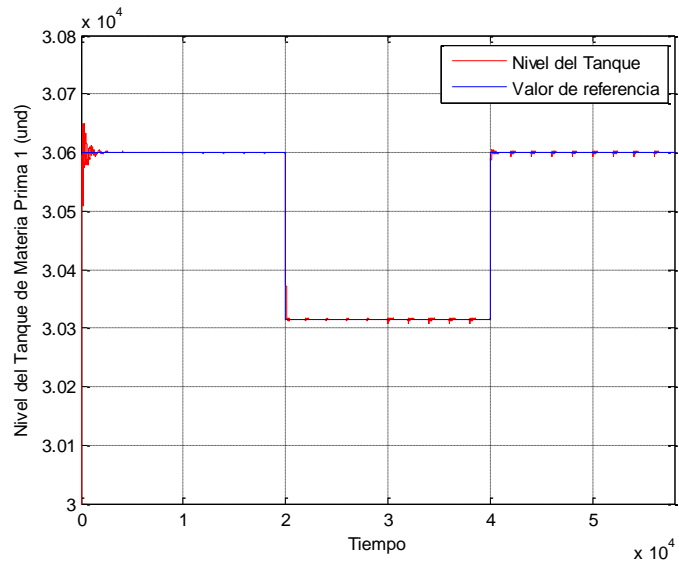


Ilustración 403 Variable MP 1 con DMC en el proceso JS – D3 – P1.

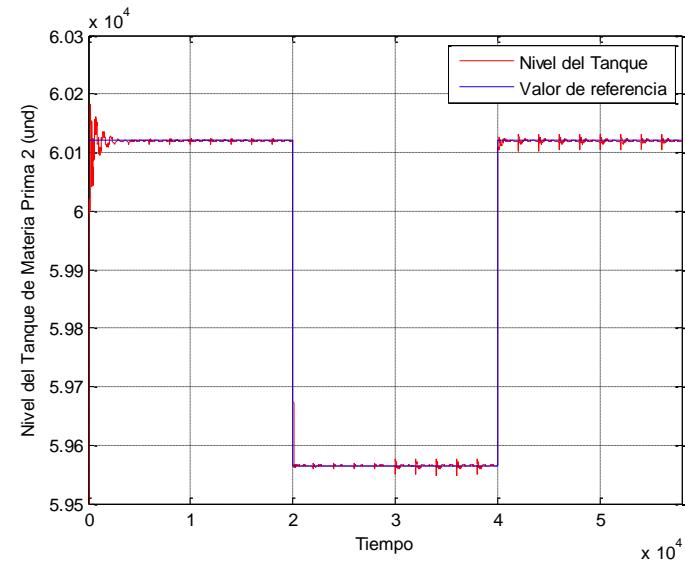


Ilustración 404 Variable MP 2 con DMC en el proceso JS – D3 – P1.

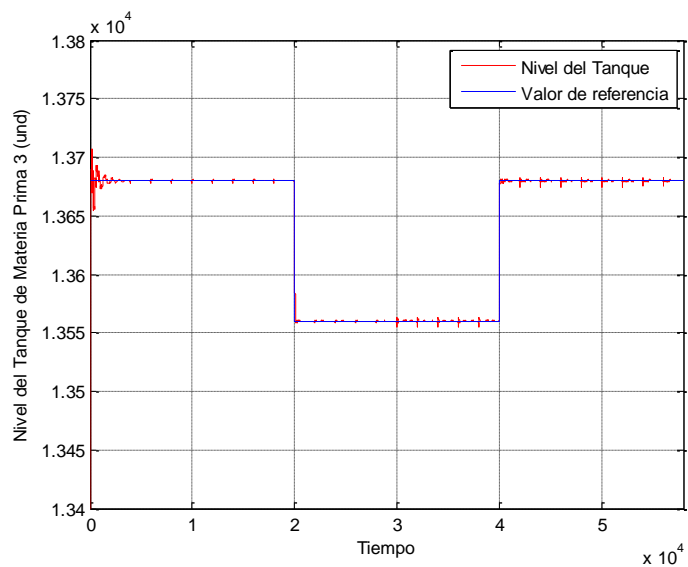


Ilustración 405 Variable MP 3 con DMC en el proceso JS – D3 – P1.

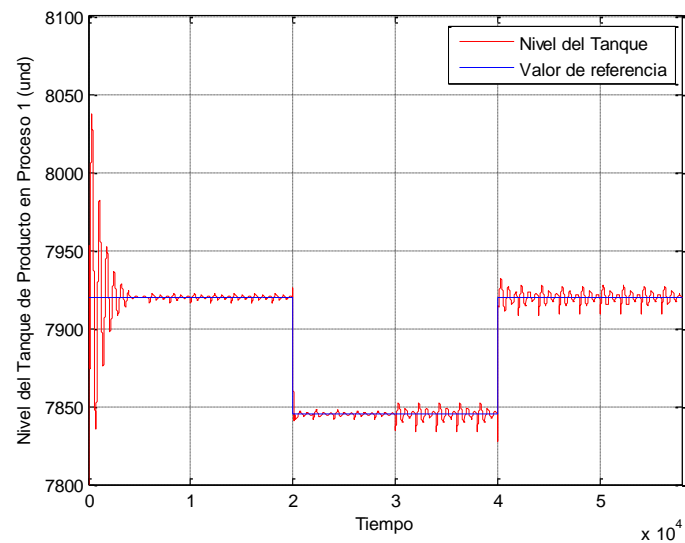


Ilustración 406 Variable PP 1 con DMC en el proceso JS – D3 – P1.

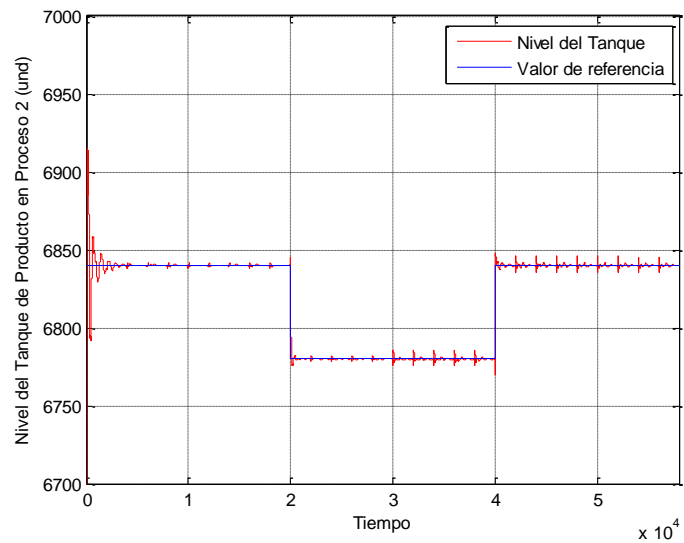


Ilustración 407 Variable PP 2 con DMC en el proceso JS – D3 – P1.

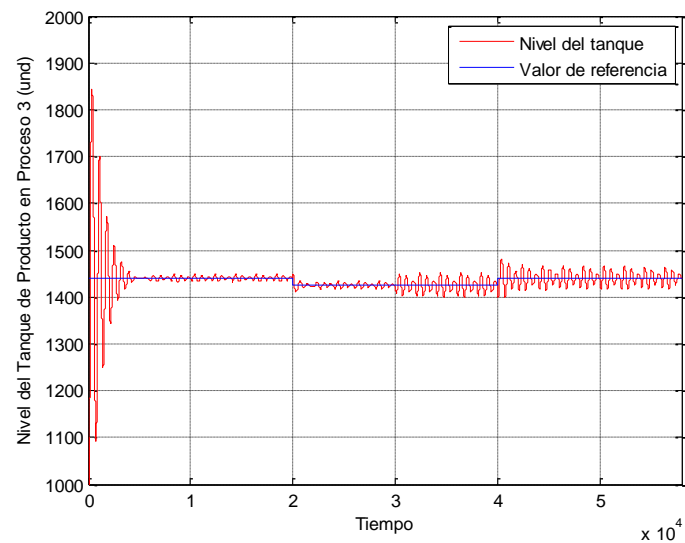


Ilustración 408 Variable PP 3 con DMC en el proceso JS – D3 – P1.

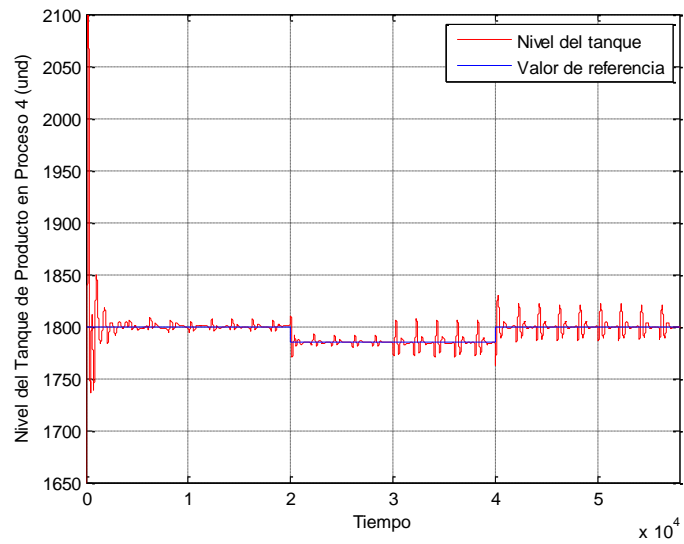


Ilustración 409 Variable PP 4 con DMC en el proceso JS – D3 – P1.

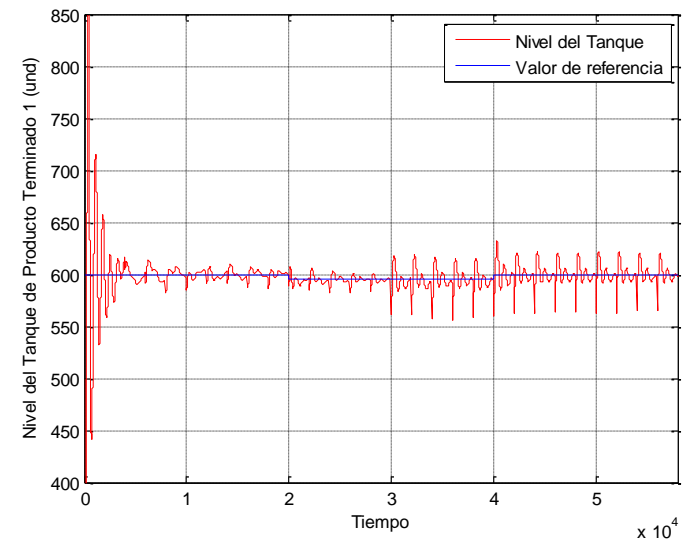


Ilustración 410 Variable PT 1 con DMC en el proceso JS – D3 – P1.

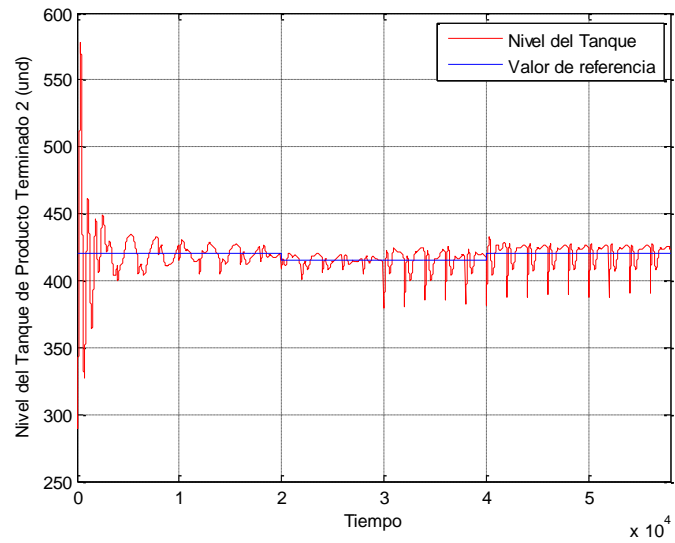


Ilustración 411 Variable PT 2 con DMC en el proceso JS – D3 – P1.

ANEXO 28. IMPLEMENTACIÓN DMC AL PROCESO JS CON D3 – P2.

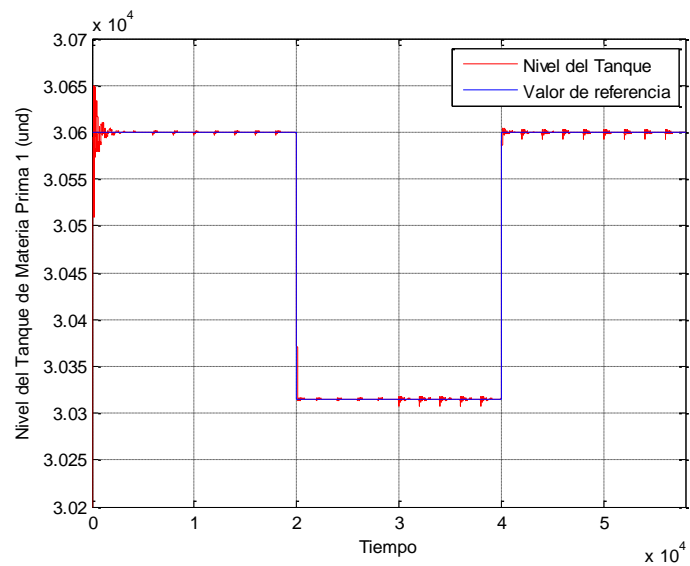


Ilustración 412 Variable MP 1 con DMC en el proceso JS – D3 – P2.

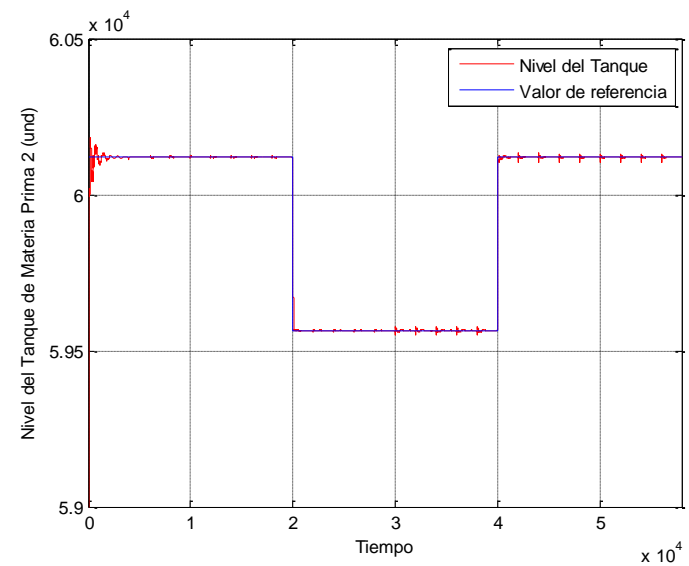


Ilustración 413 Variable MP 2 con DMC en el proceso JS – D3 – P2.

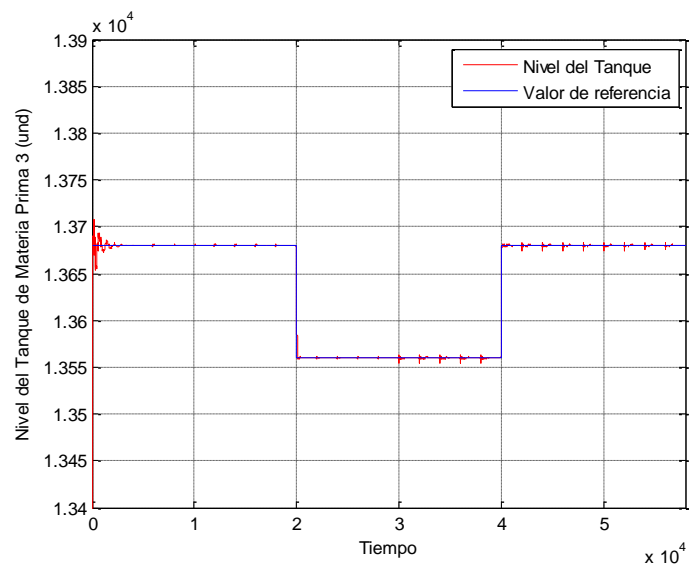


Ilustración 414 Variable MP 3 con DMC en el proceso JS – D3 – P2.

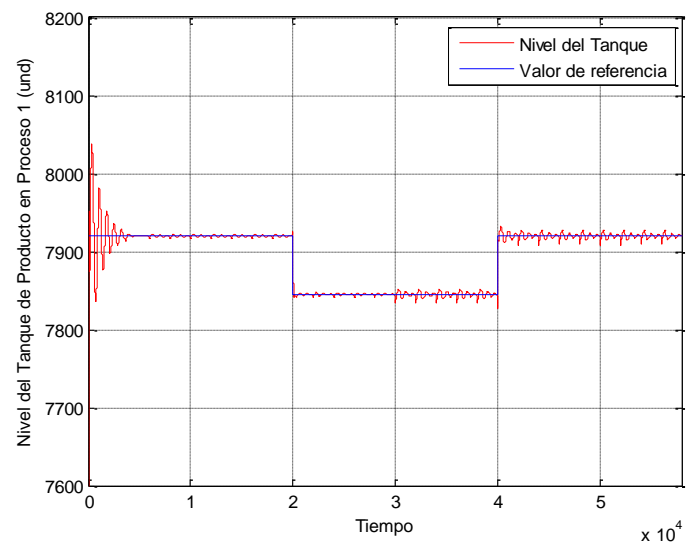


Ilustración 415 Variable PP 1 con DMC en el proceso JS – D3 – P2.

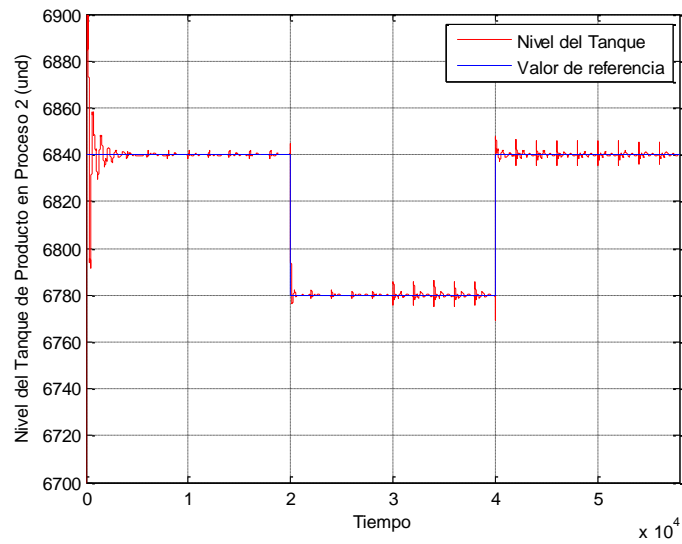


Ilustración 416 Variable PP 2 con DMC en el proceso JS – D3 – P2.

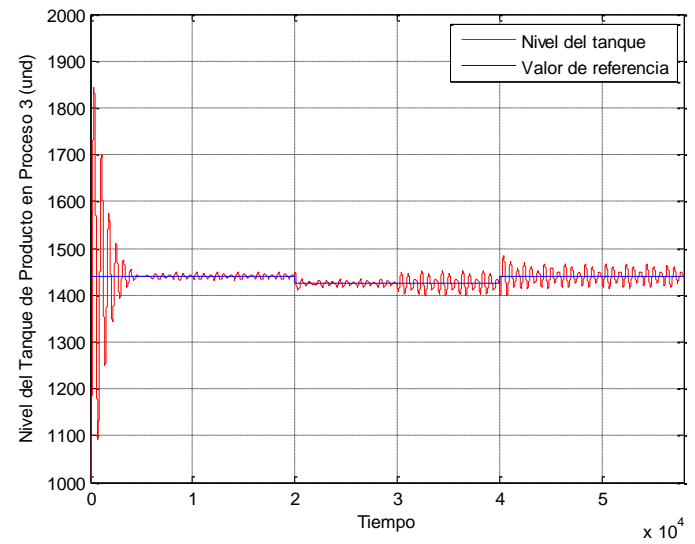


Ilustración 417 Variable PP 3 con DMC en el proceso JS – D3 – P2.

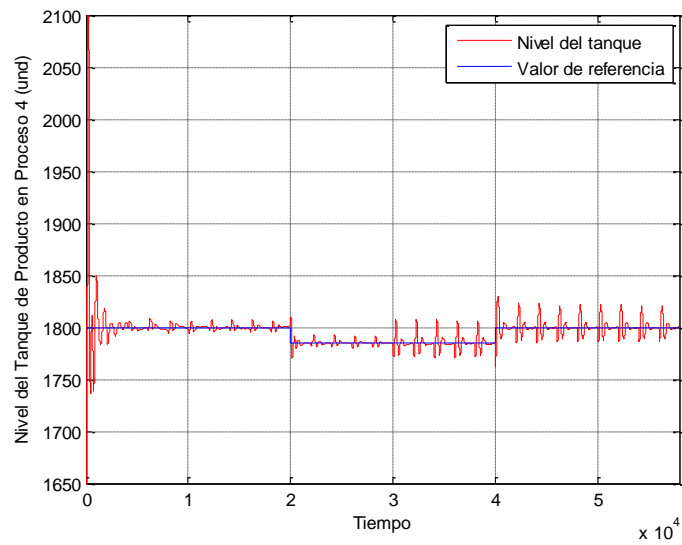


Ilustración 418 Variable PP 4 con DMC en el proceso JS – D3 – P2.

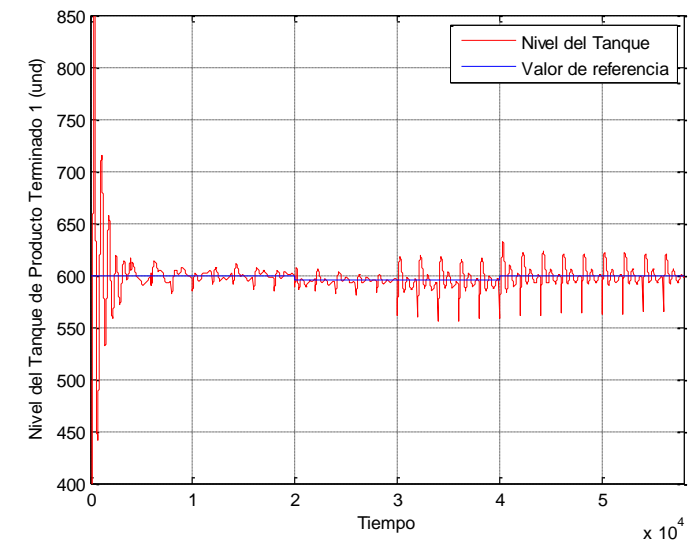


Ilustración 419 Variable PT 1 con DMC en el proceso JS – D3 – P2.

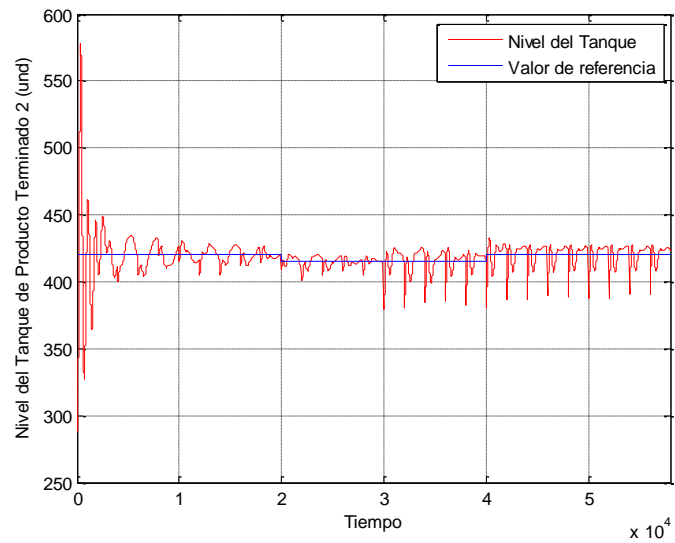


Ilustración 420 Variable PT 2 con DMC en el proceso JS – D3 – P2.

#### ANEXO 29. IMPLEMENTACIÓN DMC AL PROCESO JS CON D3 – P3.

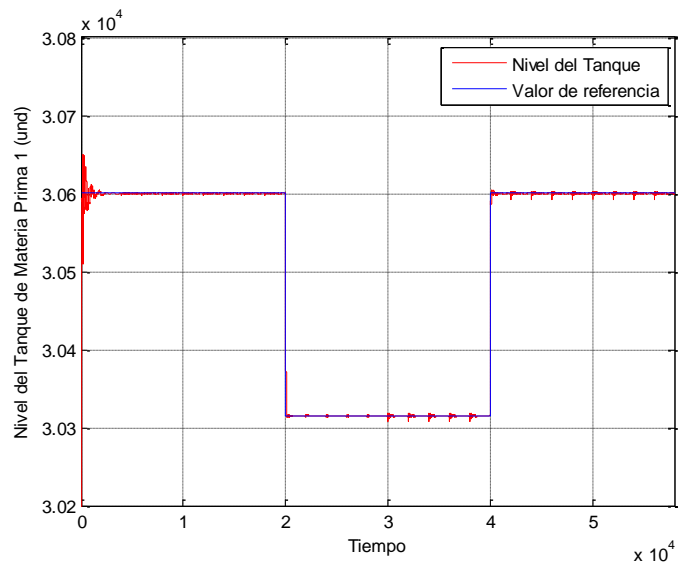


Ilustración 421 Variable MP 1 con DMC en el proceso JS – D3 – P3.

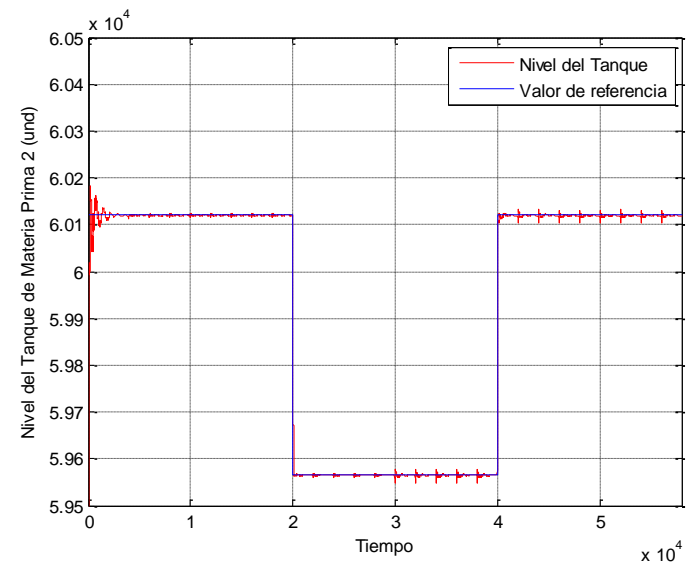


Ilustración 422 Variable MP 2 con DMC en el proceso JS – D3 – P3.

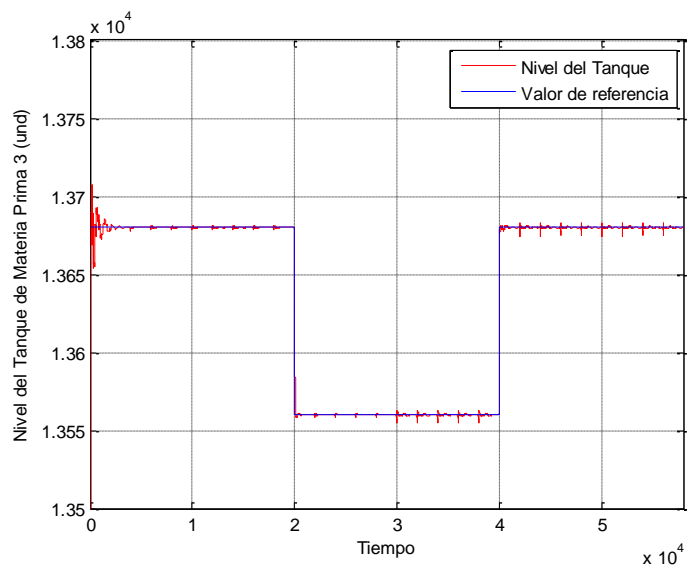


Ilustración 423 Variable MP 3 con DMC en el proceso JS – D3 – P3.

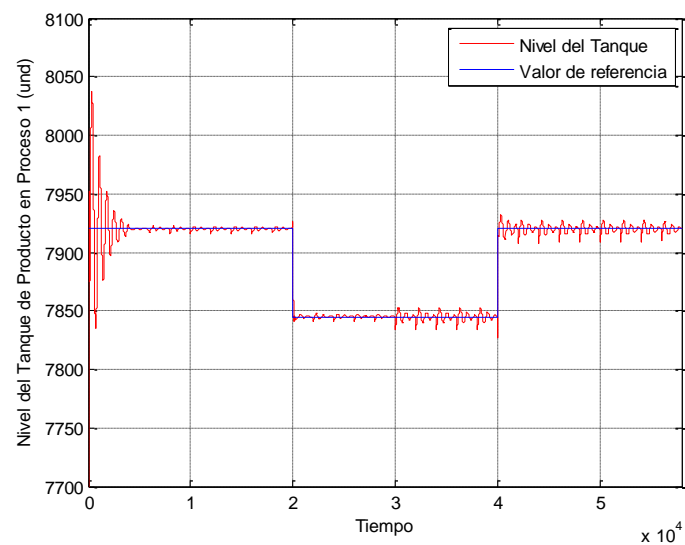


Ilustración 424 Variable PP 1 con DMC en el proceso JS – D3 – P3.

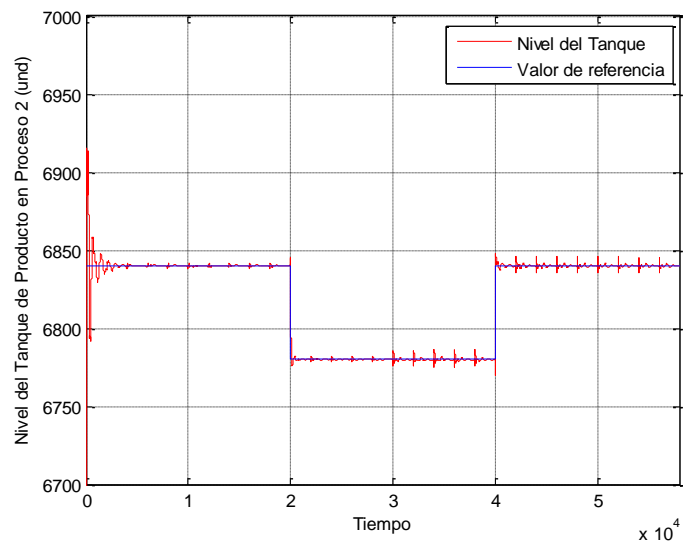


Ilustración 425 Variable PP 2 con DMC en el proceso JS – D3 – P3.

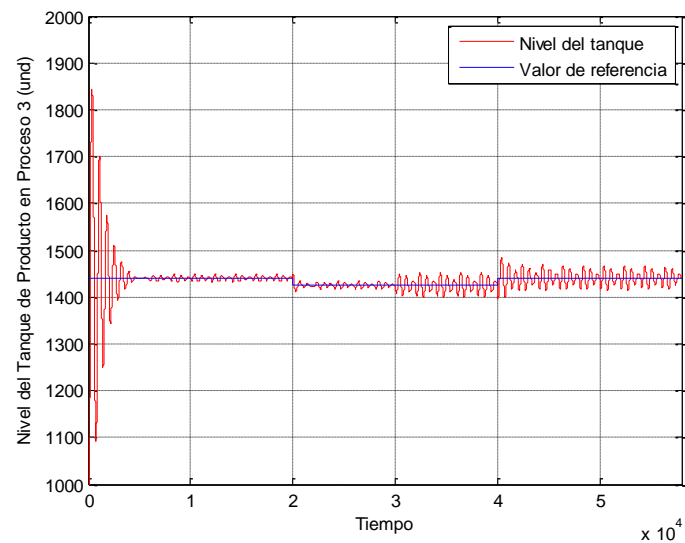


Ilustración 426 Variable PP 3 con DMC en el proceso JS – D3 – P3.



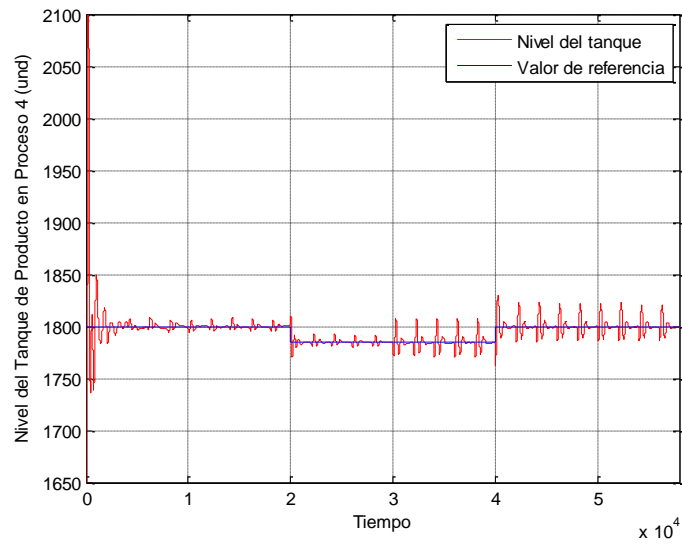


Ilustración 427 Variable PP 4 con DMC en el proceso JS – D3 – P3.

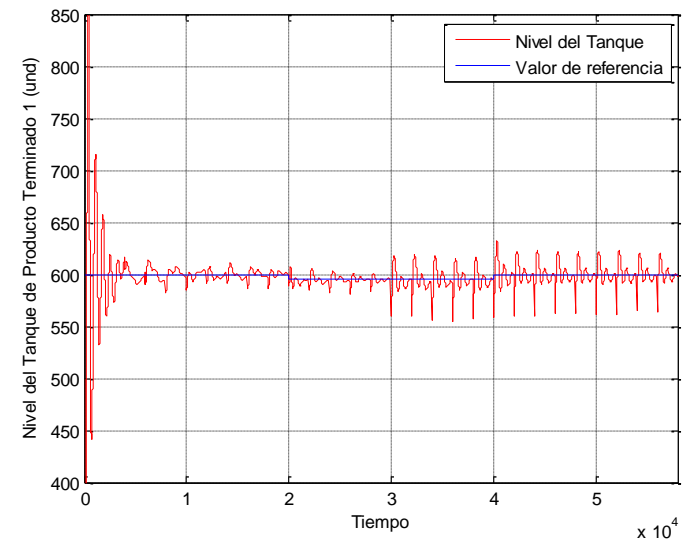


Ilustración 428 Variable PT 1 con DMC en el proceso JS – D3 – P3.

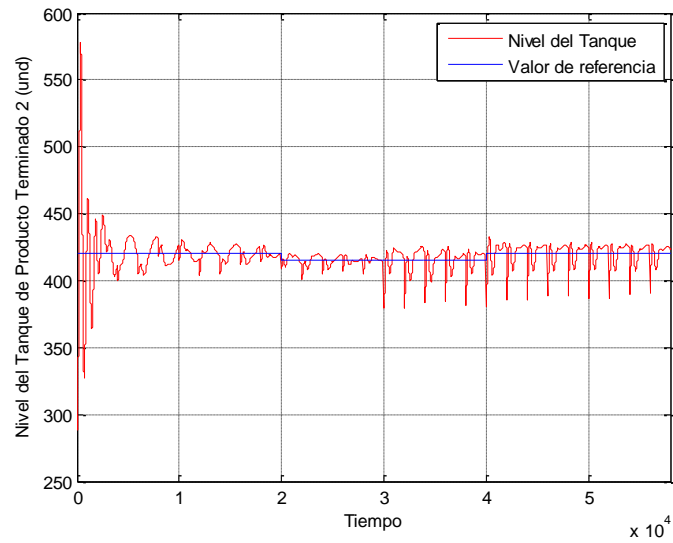


Ilustración 429 Variable PT 2 con DMC en el proceso JS – D3 – P3.

ANEXO 30. IMPLEMENTACIÓN DMC AL PROCESO FFS CON D1 – P1.

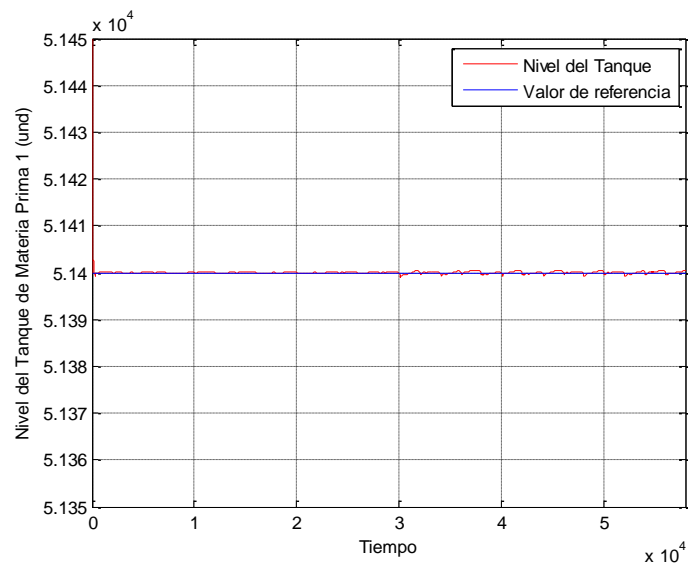


Ilustración 430 Variable MP 1 con DMC en el proceso FFS – D1 – P1.

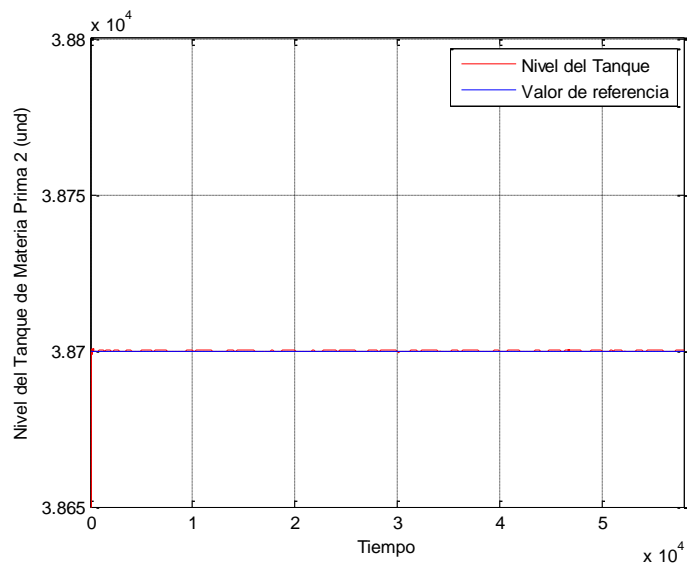


Ilustración 431 Variable MP 2 con DMC en el proceso FFS – D1 – P1.

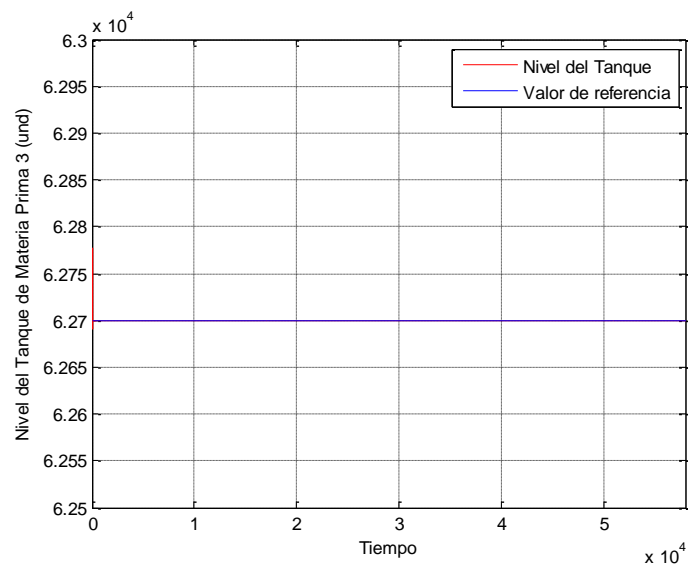


Ilustración 432 Variable MP 3 con DMC en el proceso FFS – D1 – P1.

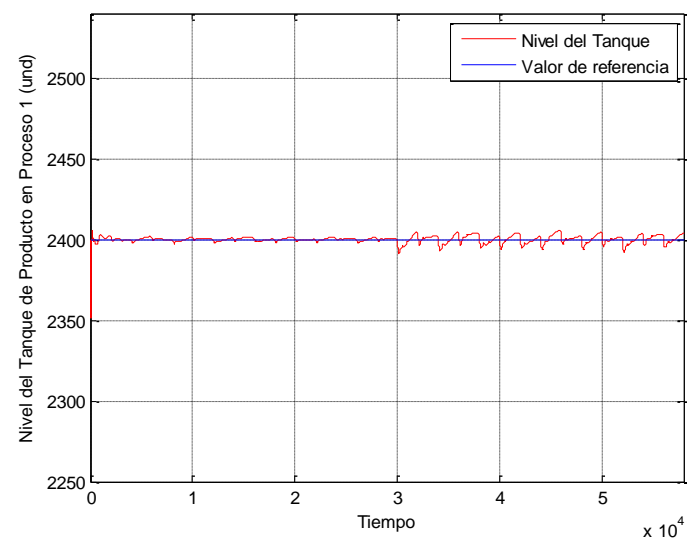


Ilustración 433 Variable PP 1 con DMC en el proceso FFS – D1 – P1.

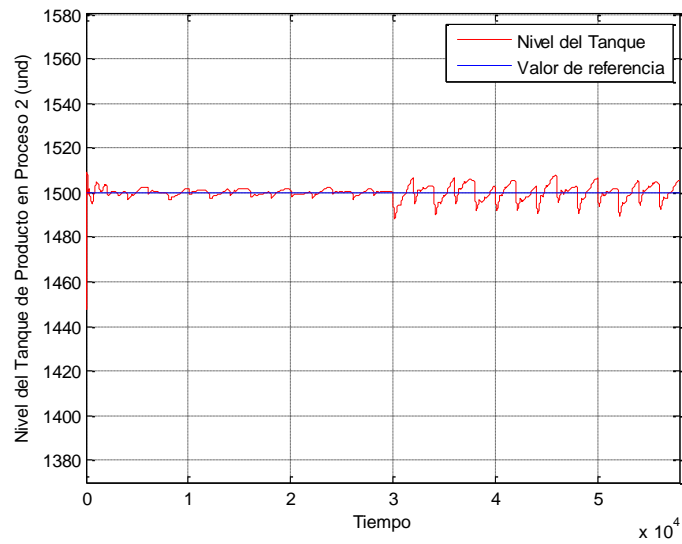


Ilustración 434 Variable PP 2 con DMC en el proceso FFS - D1 - P1.

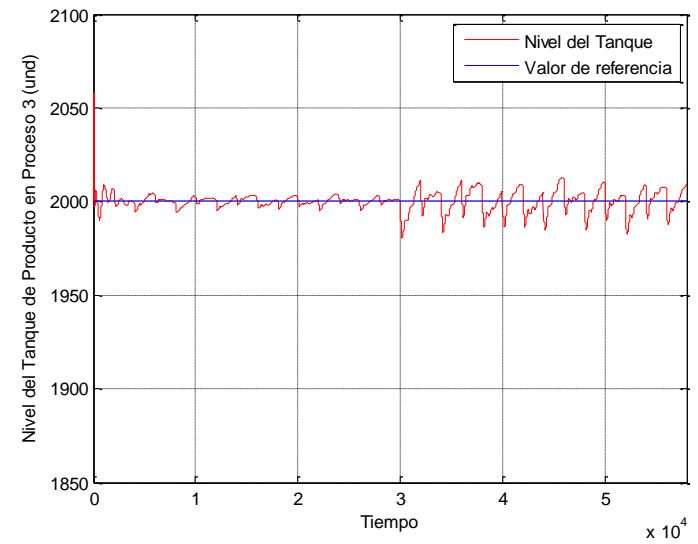


Ilustración 435 Variable PP 3 con DMC en el proceso FFS - D1 - P1.

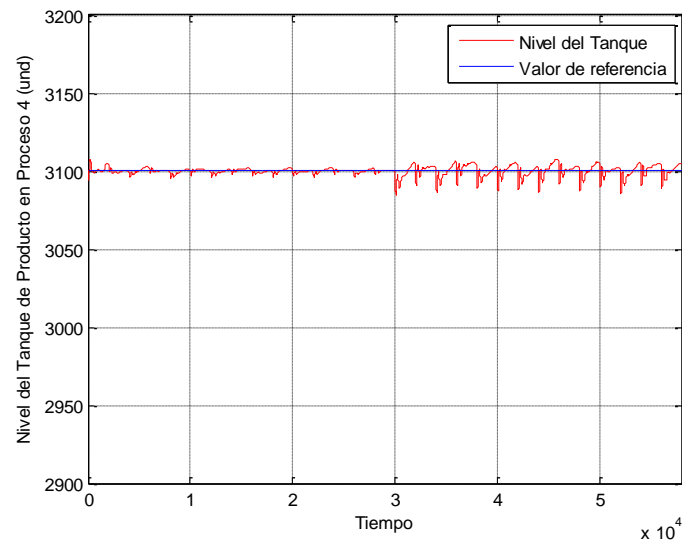


Ilustración 436 Variable PP 4 con DMC en el proceso FFS - D1 - P1.

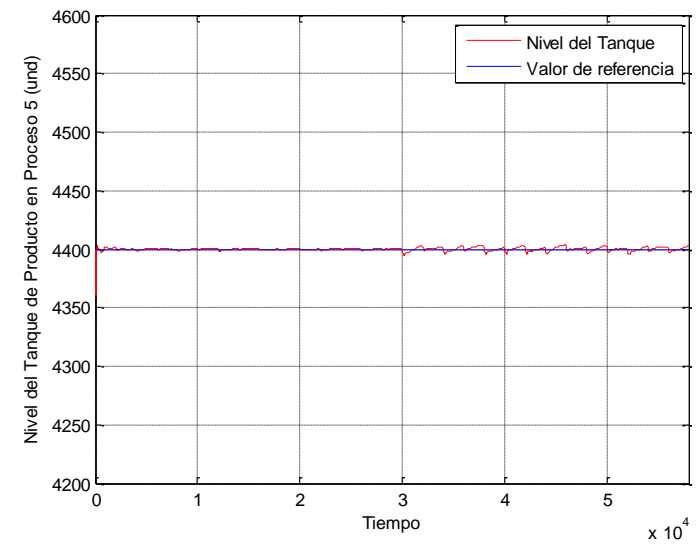


Ilustración 437 Variable PP 5 con DMC en el proceso FFS - D1 - P1.

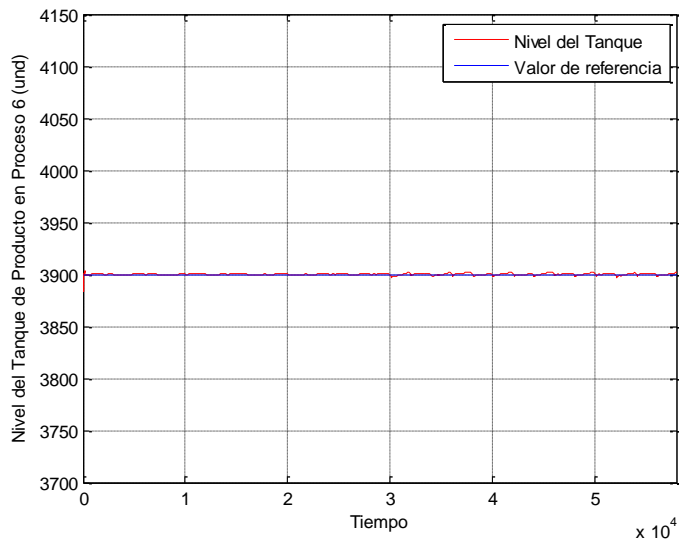


Ilustración 438 Variable PP 6 con DMC en el proceso FFS – D1 – P1.

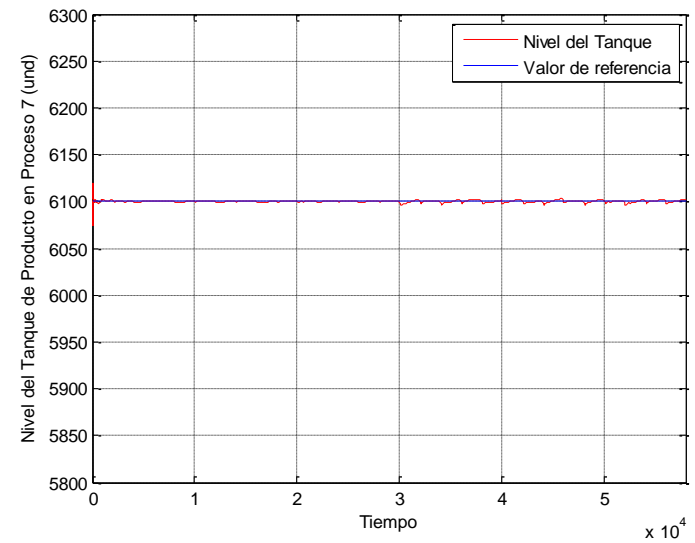


Ilustración 439 Variable PP 7 con DMC en el proceso FFS – D1 – P1.

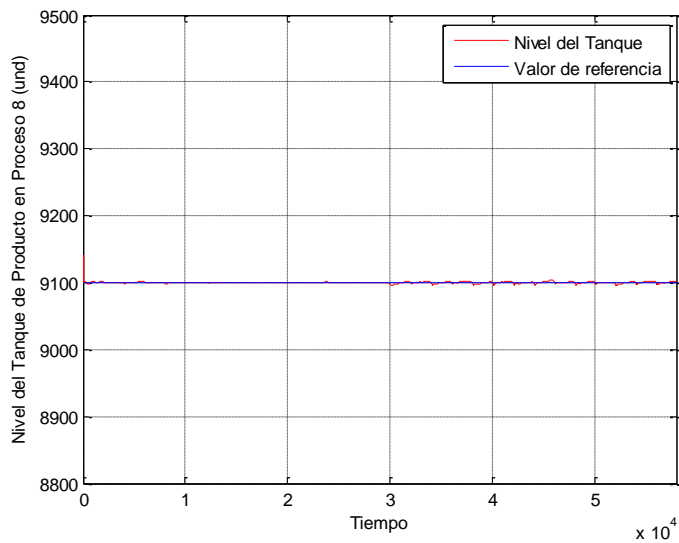


Ilustración 440 Variable PP 8 con DMC en el proceso FFS – D1 – P1.

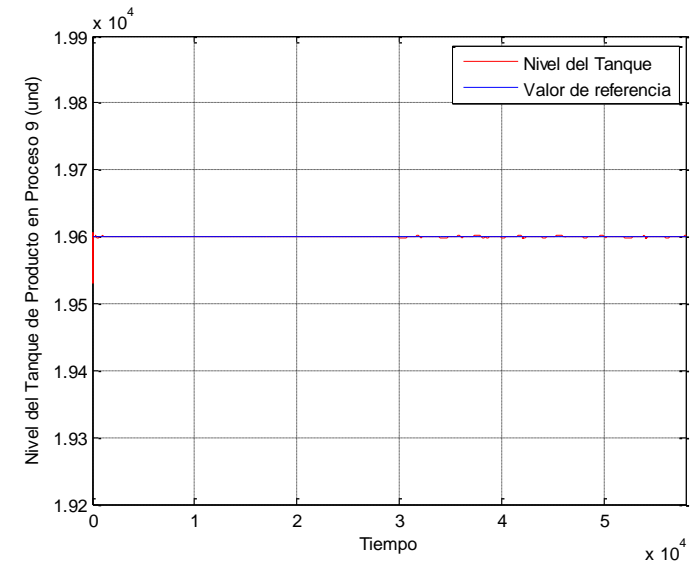


Ilustración 441 Variable PP 9 con DMC en el proceso FFS – D1 – P1.

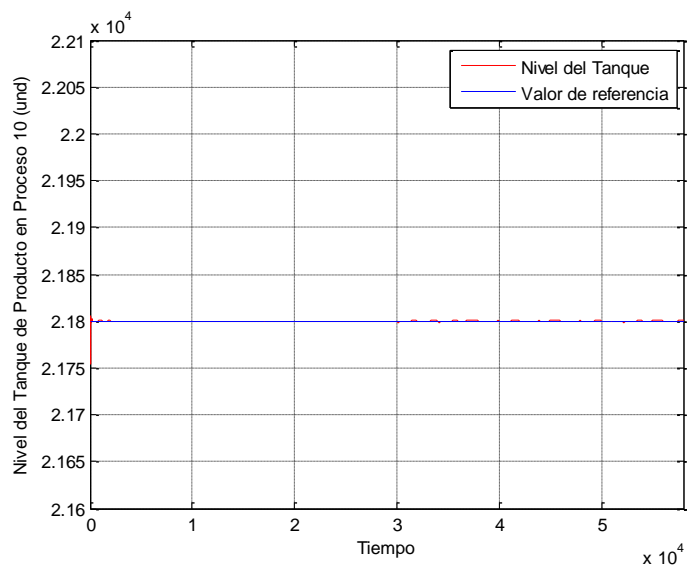


Ilustración 442 Variable PP 10 con DMC en el proceso FFS – D1 – P1.

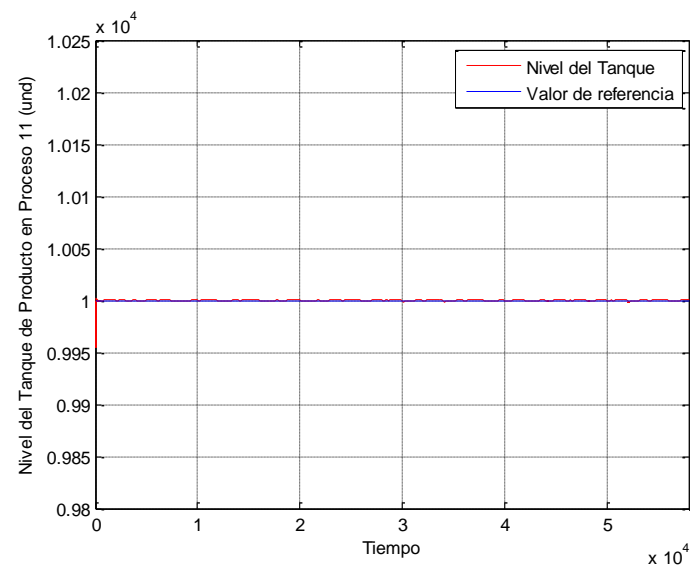


Ilustración 443 Variable PP 11 con DMC en el proceso FFS – D1 – P1.

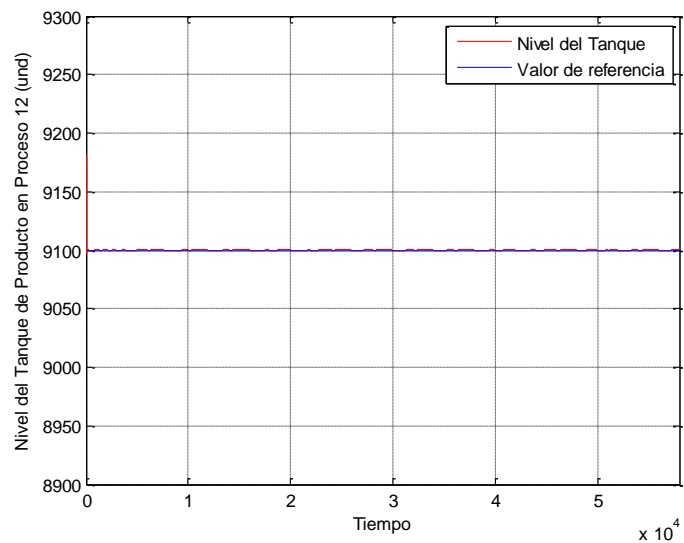


Ilustración 444 Variable PP 12 con DMC en el proceso FFS – D1 – P1.

ANEXO 31. IMPLEMENTACIÓN DMC AL PROCESO FFS CON D1 – P2.

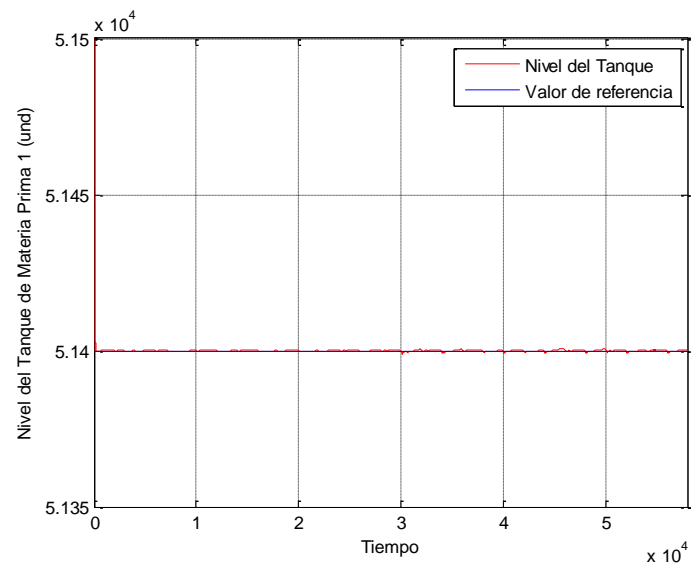


Ilustración 445 Variable MP 1 con DMC en el proceso FFS – D1 – P2.

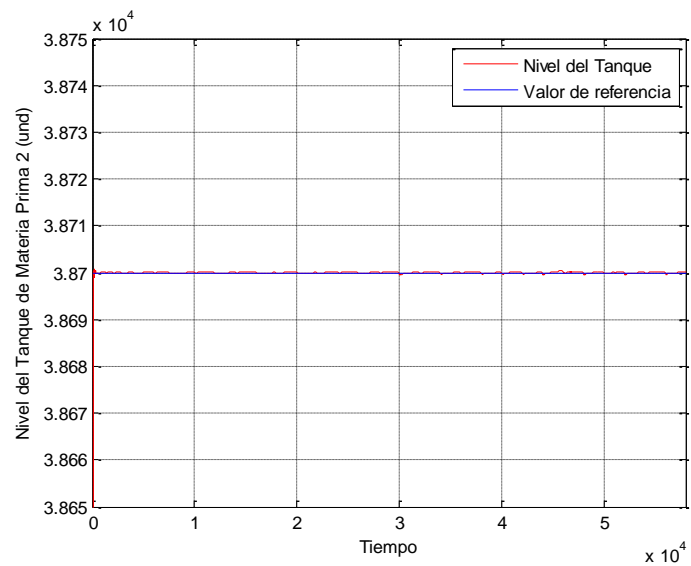


Ilustración 446 Variable MP 2 con DMC en el proceso FFS – D1 – P2.

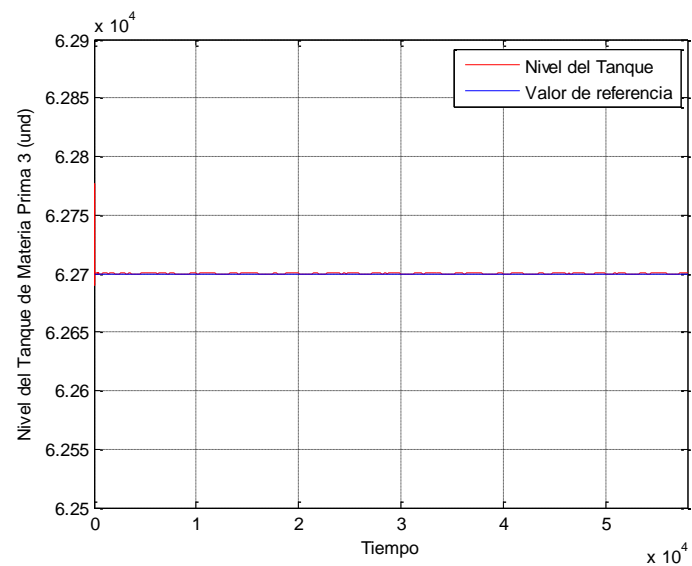


Ilustración 447 Variable MP 3 con DMC en el proceso FFS – D1 – P2.

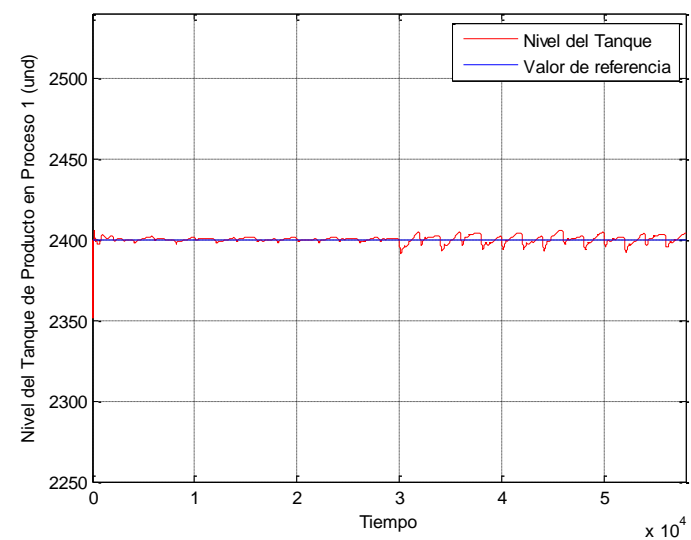


Ilustración 448 Variable PP 1 con DMC en el proceso FFS – D1 – P2.

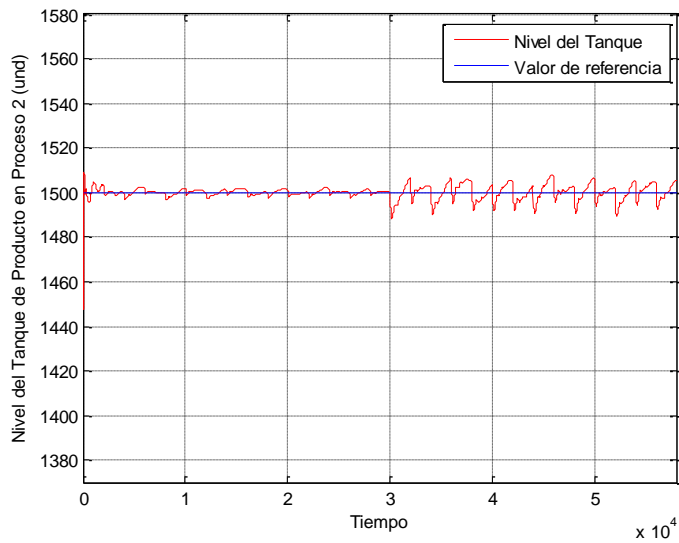


Ilustración 449 Variable PP 2 con DMC en el proceso FFS – D1 – P2.

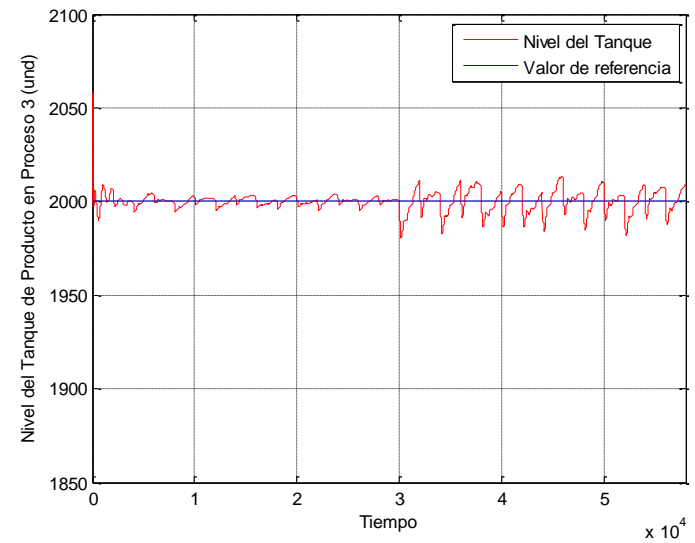


Ilustración 450 Variable PP 3 con DMC en el proceso FFS – D1 – P2.

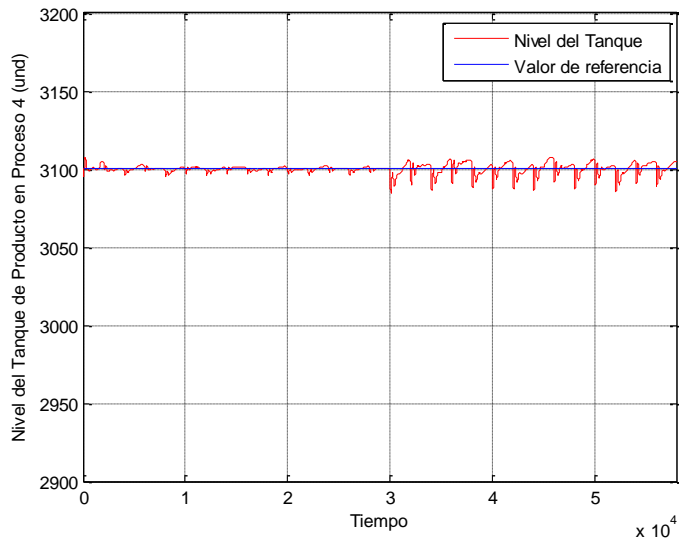


Ilustración 451 Variable PP 4 con DMC en el proceso FFS – D1 – P2.

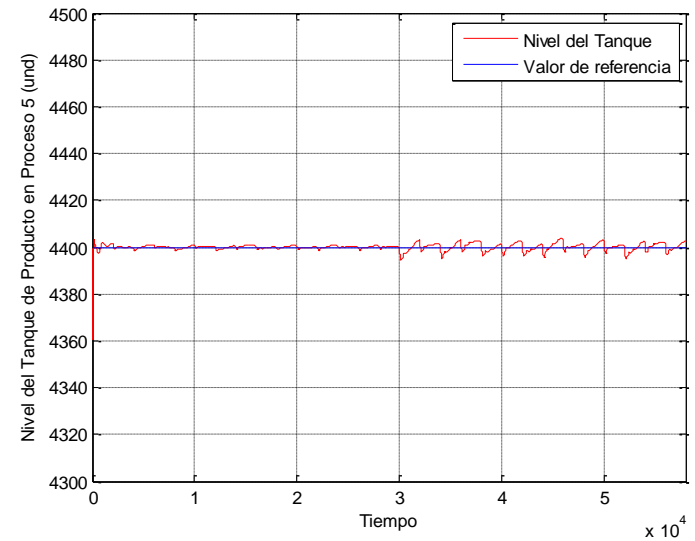


Ilustración 452 Variable PP 5 con DMC en el proceso FFS – D1 – P2.

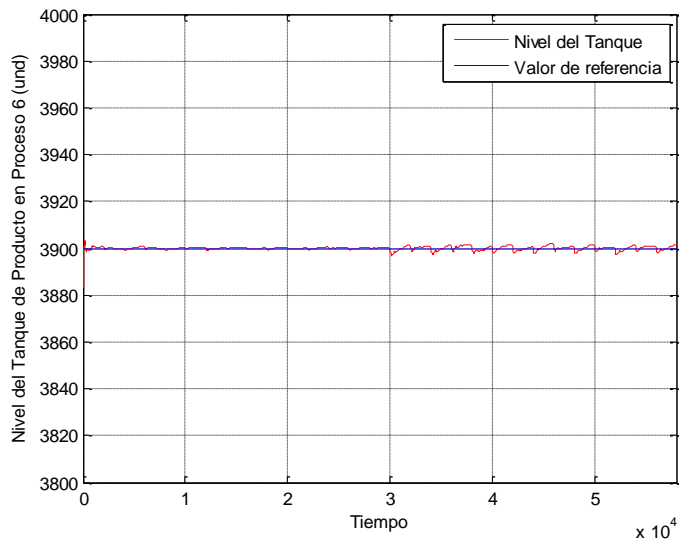


Ilustración 453 Variable PP 6 con DMC en el proceso FFS – D1 – P2.

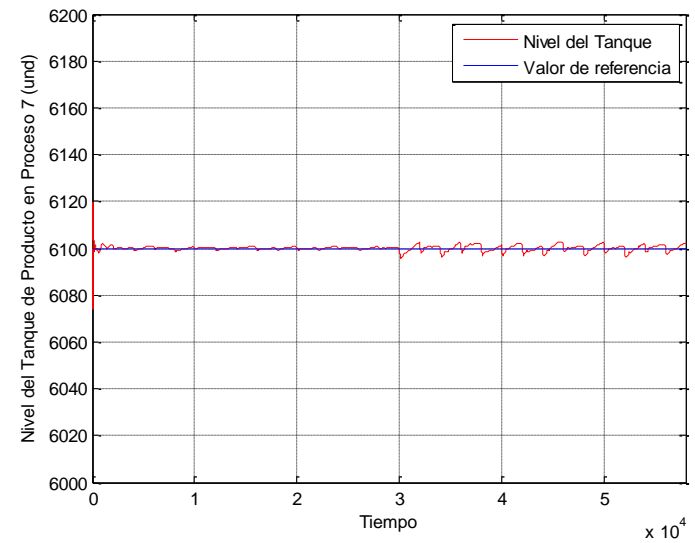


Ilustración 454 Variable PP 7 con DMC en el proceso FFS – D1 – P2.

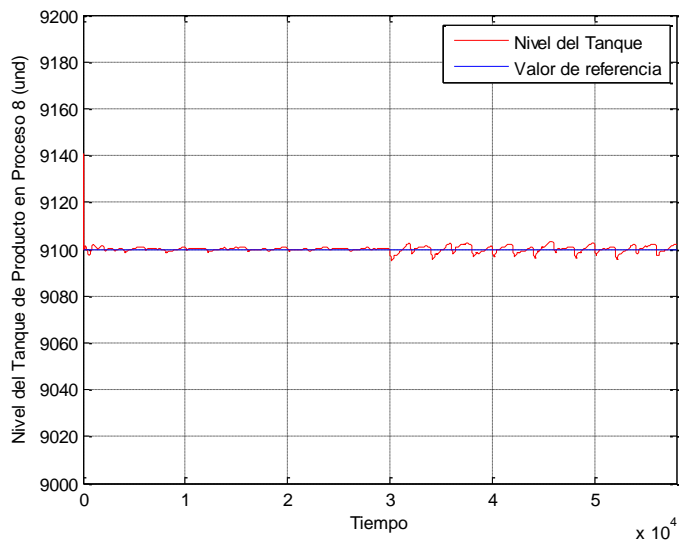


Ilustración 455 Variable PP 8 con DMC en el proceso FFS – D1 – P2.

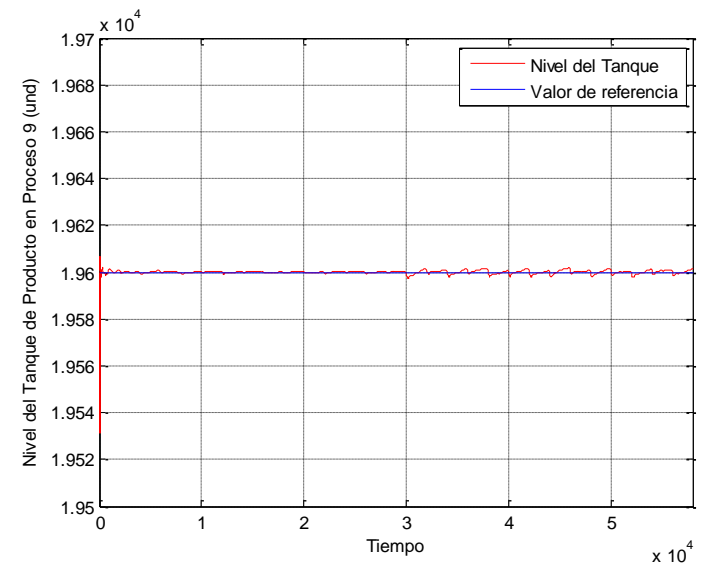


Ilustración 456 Variable PP 9 con DMC en el proceso FFS – D1 – P2.



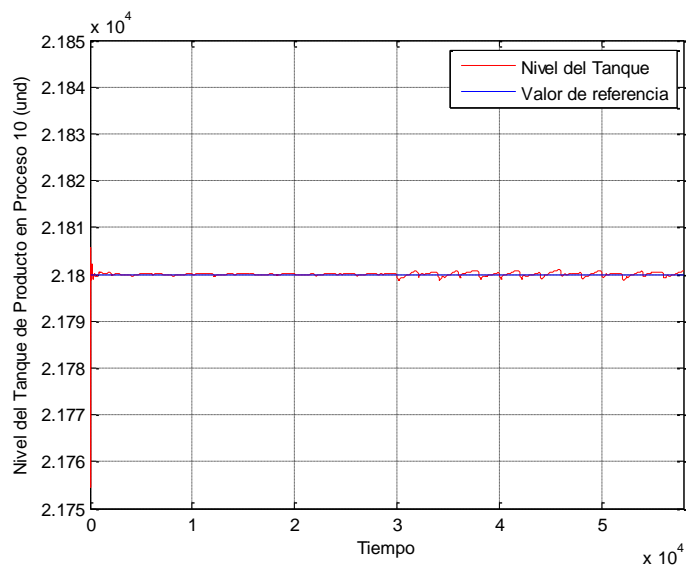


Ilustración 457 Variable PP 10 con DMC en el proceso FFS – D1 – P2.

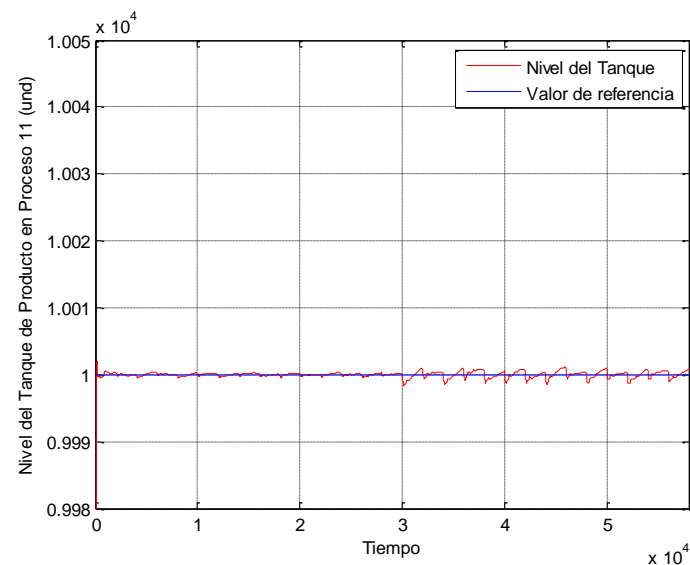


Ilustración 458 Variable PP 11 con DMC en el proceso FFS – D1 – P2.

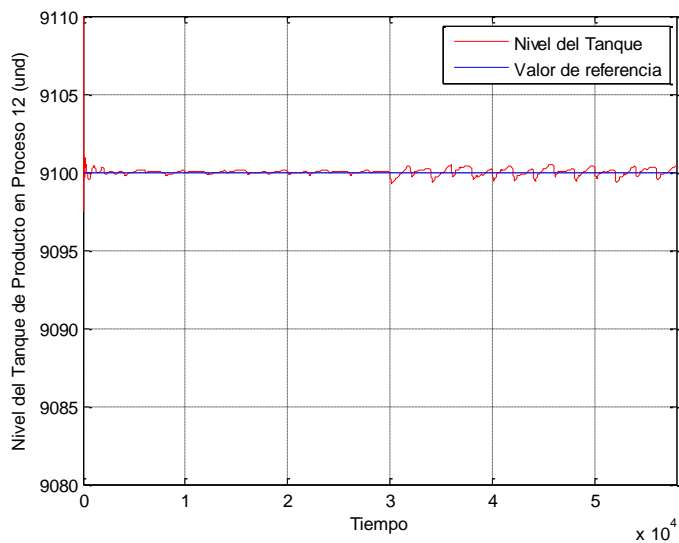


Ilustración 459 Variable PP 12 con DMC en el proceso FFS – D1 – P2.

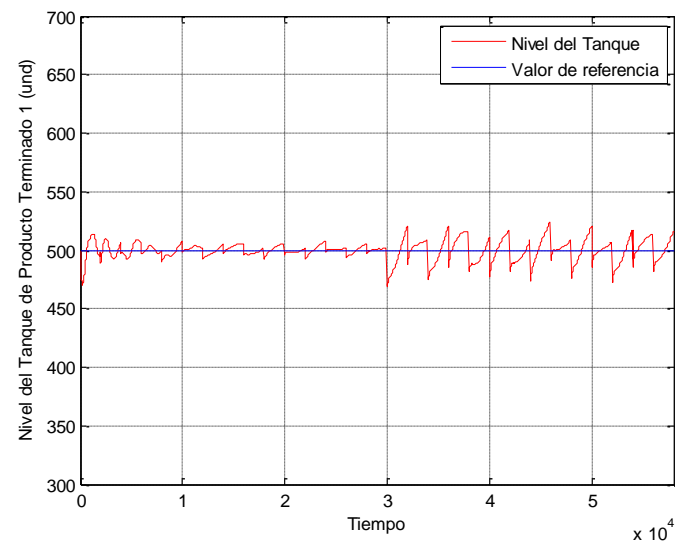


Ilustración 460 Variable PT 1 con DMC en el proceso FFS – D1 – P2.

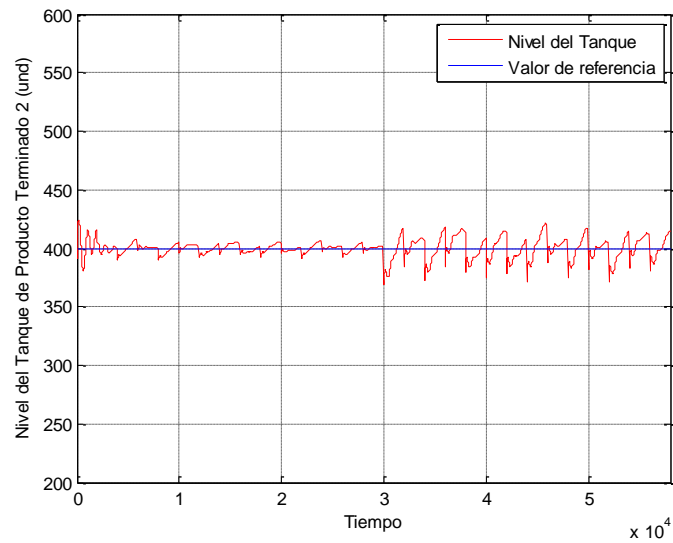


Ilustración 461 Variable PT 2 con DMC en el proceso FFS – D1 – P2.

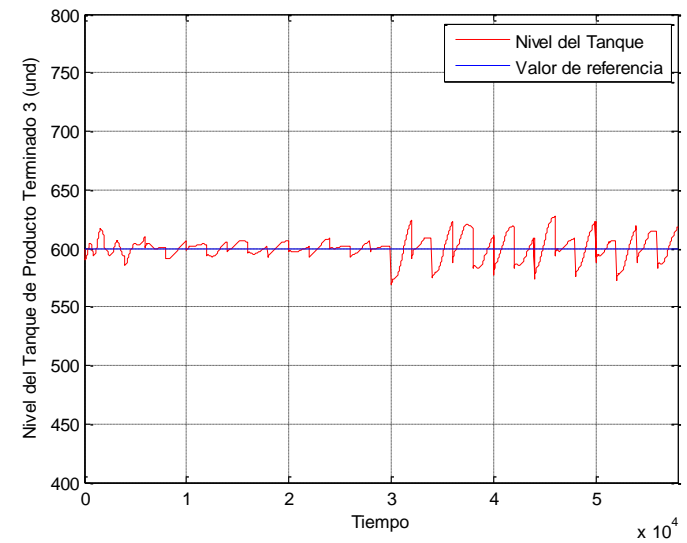


Ilustración 462 Variable PT 3 con DMC en el proceso FFS – D1 – P2.

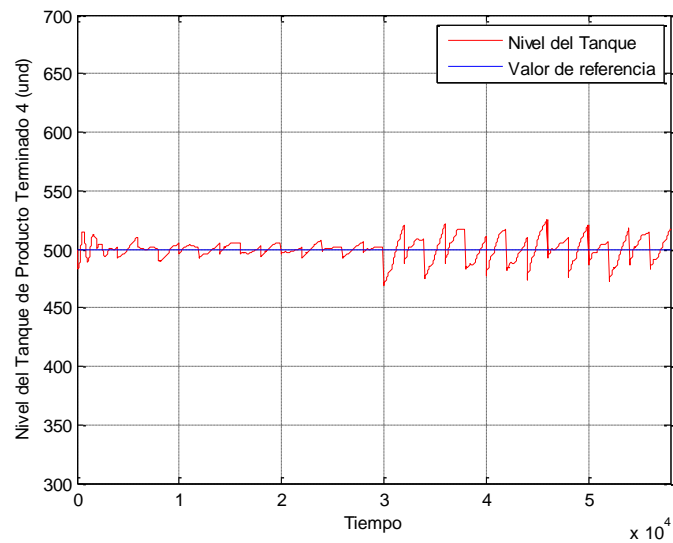


Ilustración 463 Variable PT 4 con DMC en el proceso FFS – D1 – P2.

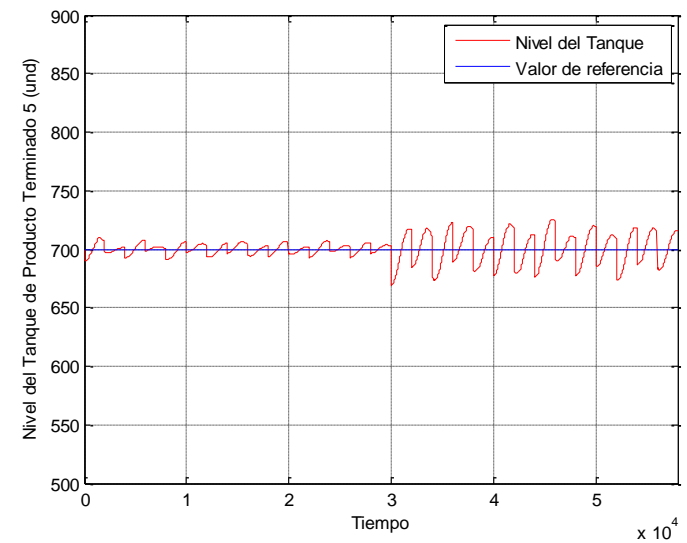


Ilustración 464 Variable PT 5 con DMC en el proceso FFS – D1 – P2.

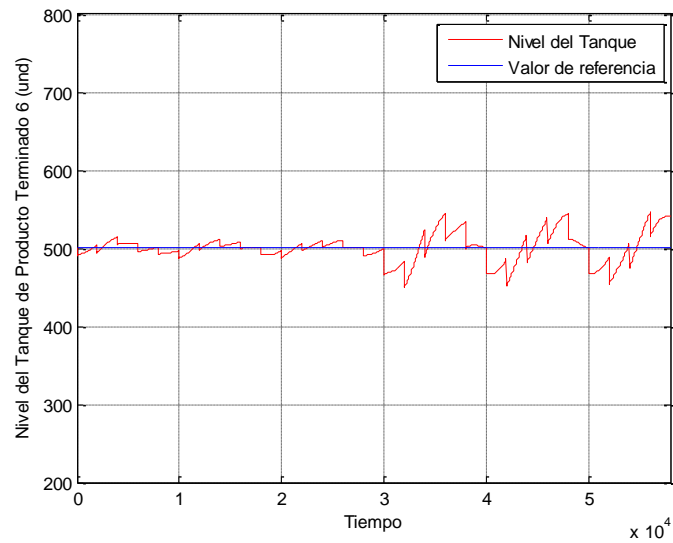


Ilustración 465 Variable PT 6 con DMC en el proceso FFS – D1 – P2.

#### ANEXO 32. IMPLEMENTACIÓN DMC AL PROCESO FFS CON D1 – P3.

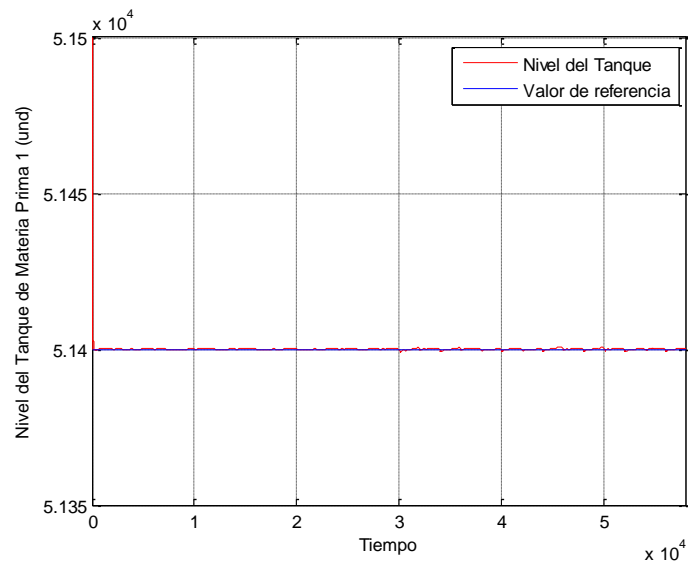


Ilustración 466 Variable MP 1 con DMC en el proceso FFS – D1 – P3.

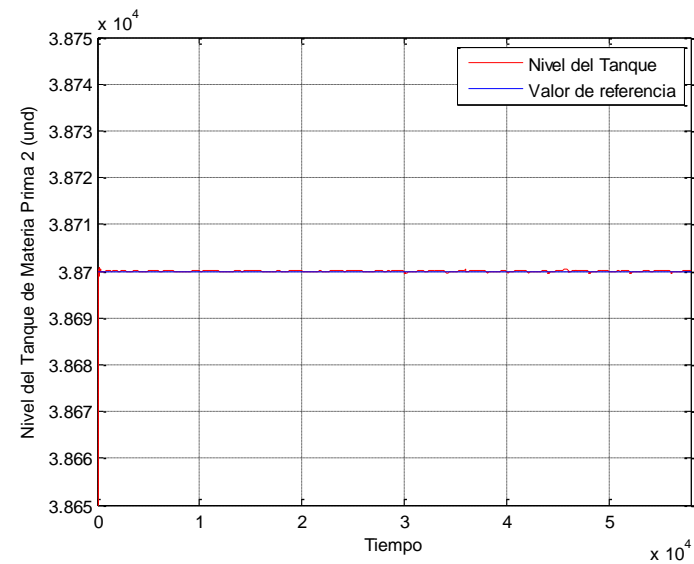


Ilustración 467 Variable MP 2 con DMC en el proceso FFS – D1 – P3.

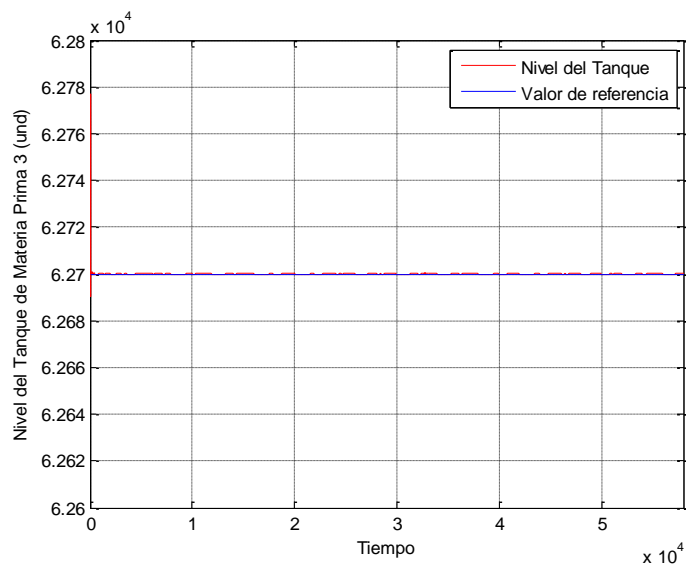


Ilustración 468 Variable MP 3 con DMC en el proceso FFS – D1 – P3.

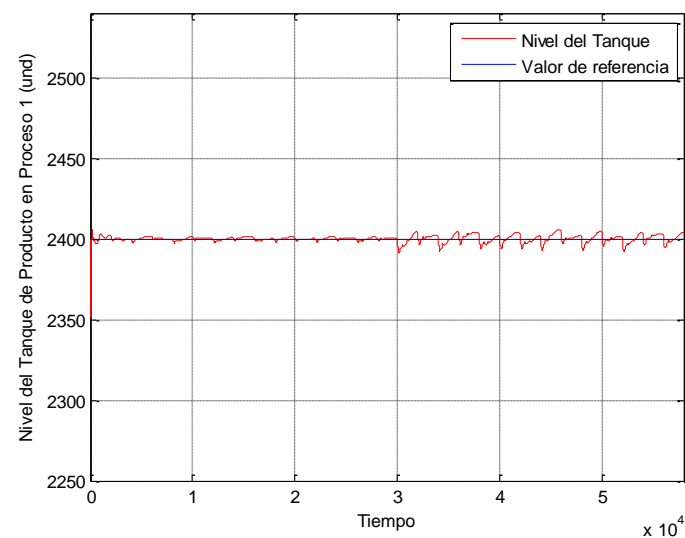


Ilustración 469 Variable PP 1 con DMC en el proceso FFS – D1 – P3.

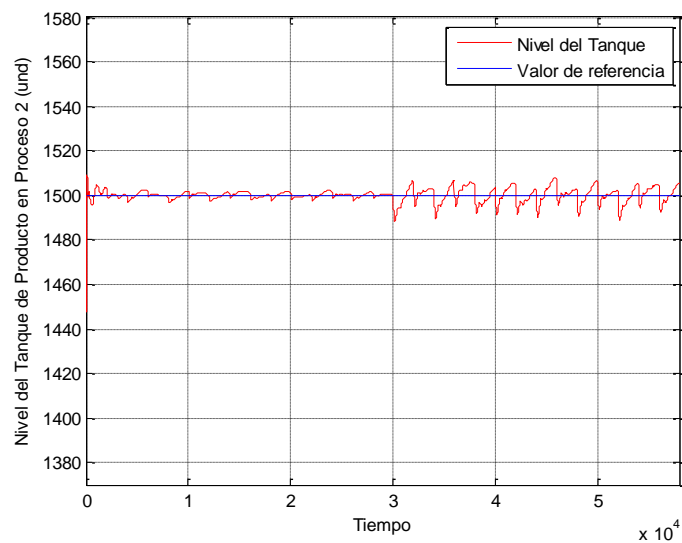


Ilustración 470 Variable PP 2 con DMC en el proceso FFS – D1 – P3.

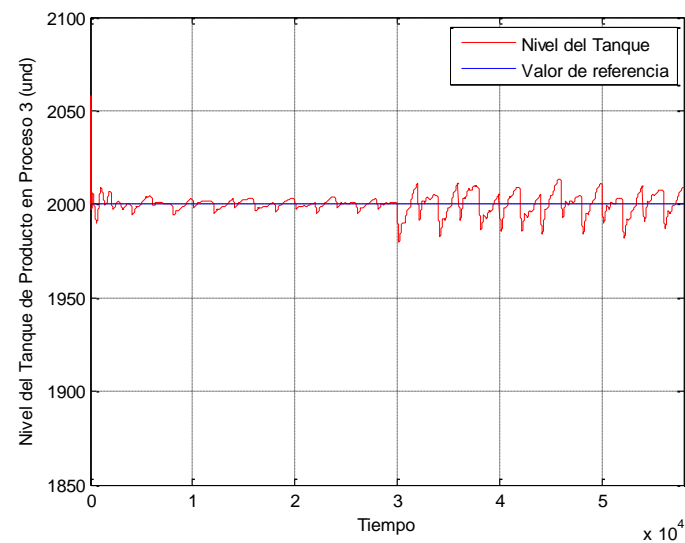


Ilustración 471 Variable PP 3 con DMC en el proceso FFS – D1 – P3.

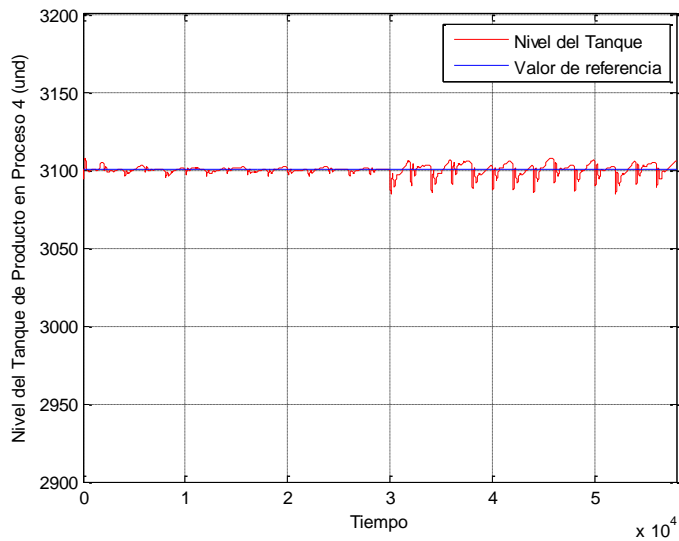


Ilustración 472 Variable PP 4 con DMC en el proceso FFS – D1 – P3.

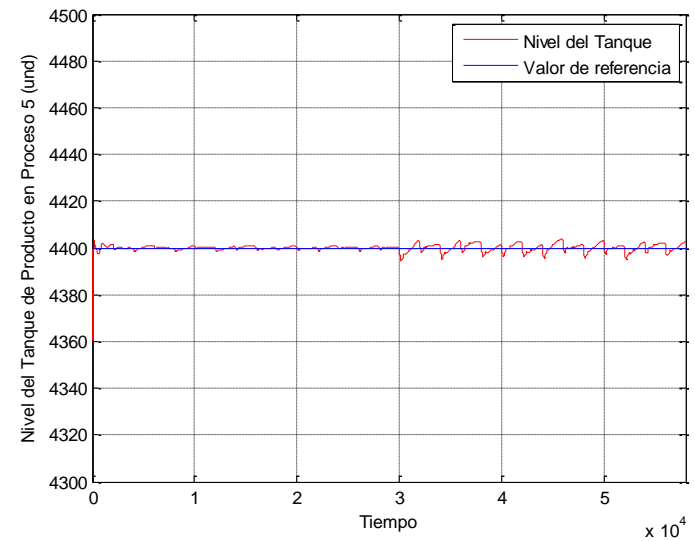


Ilustración 473 Variable PP 5 con DMC en el proceso FFS – D1 – P3.

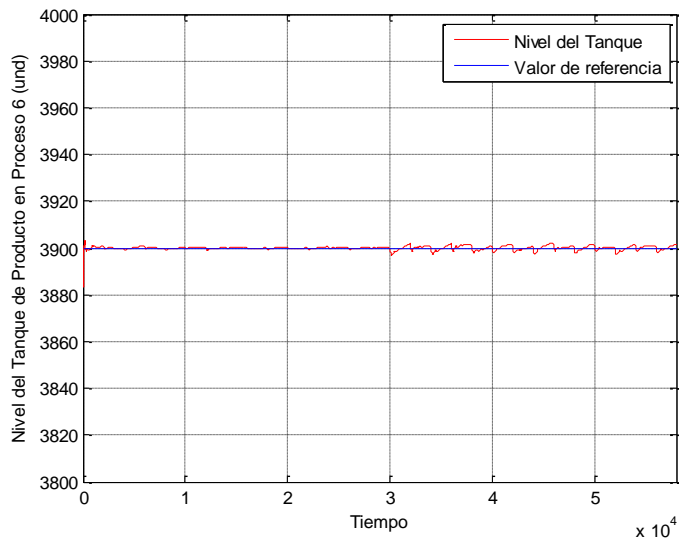


Ilustración 474 Variable PP 6 con DMC en el proceso FFS – D1 – P3.

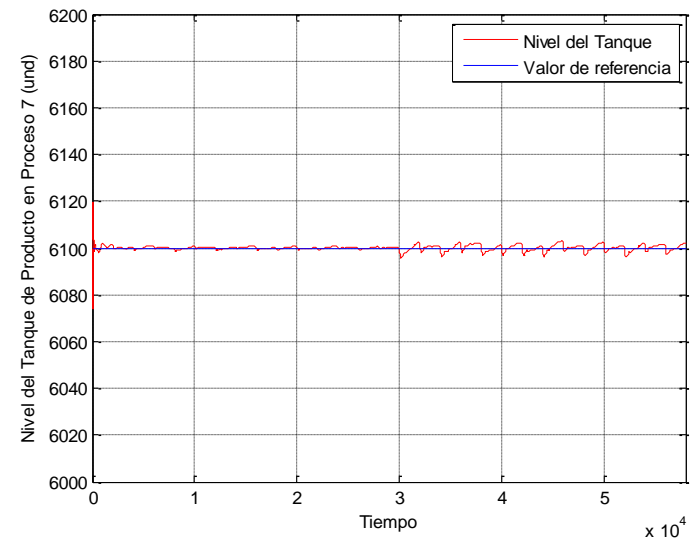


Ilustración 475 Variable PP 7 con DMC en el proceso FFS – D1 – P3.

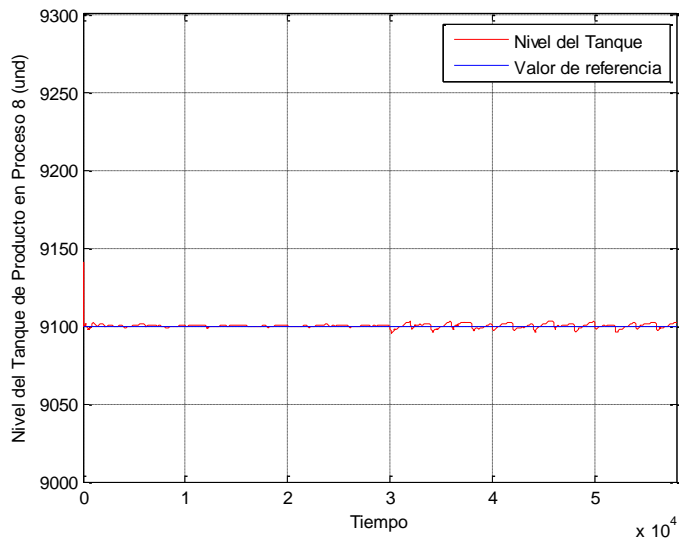


Ilustración 476 Variable PP 8 con DMC en el proceso FFS – D1 – P3.

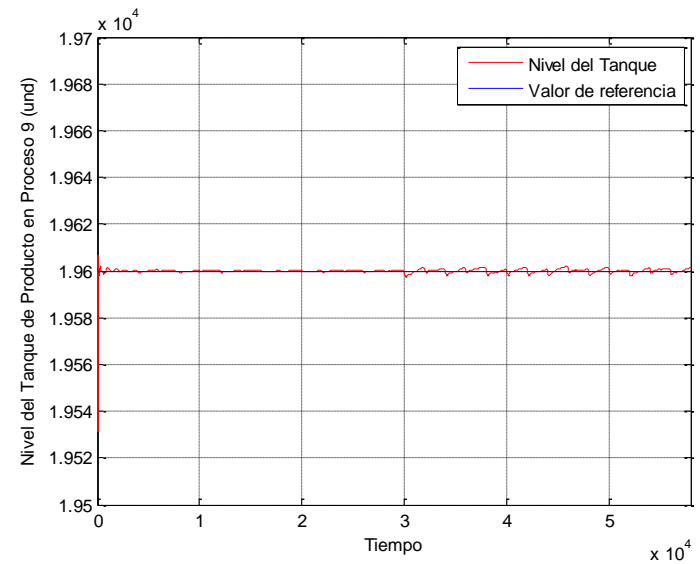


Ilustración 477 Variable PP 9 con DMC en el proceso FFS – D1 – P3.

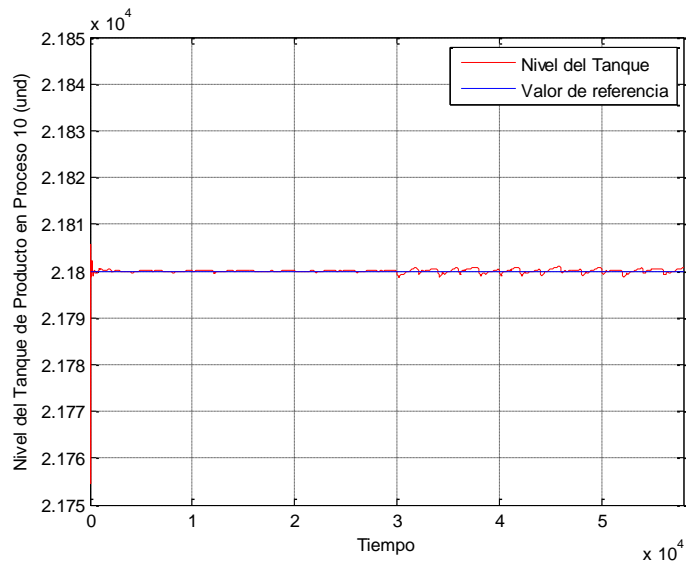


Ilustración 478 Variable PP 10 con DMC en el proceso FFS – D1 – P3.

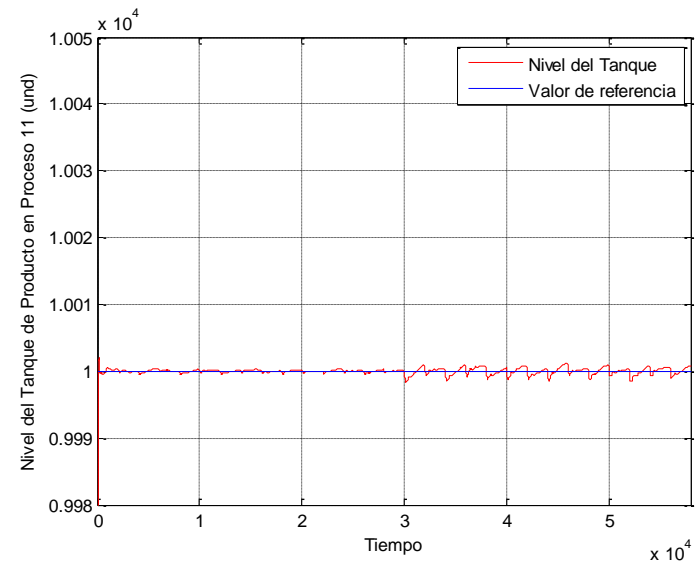


Ilustración 479 Variable PP 11 con DMC en el proceso FFS – D1 – P3.

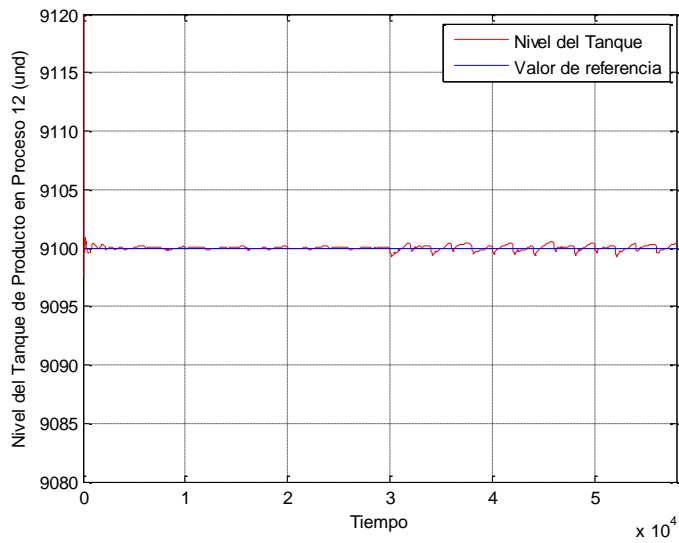


Ilustración 480 Variable PP 12 con DMC en el proceso FFS – D1 – P3.

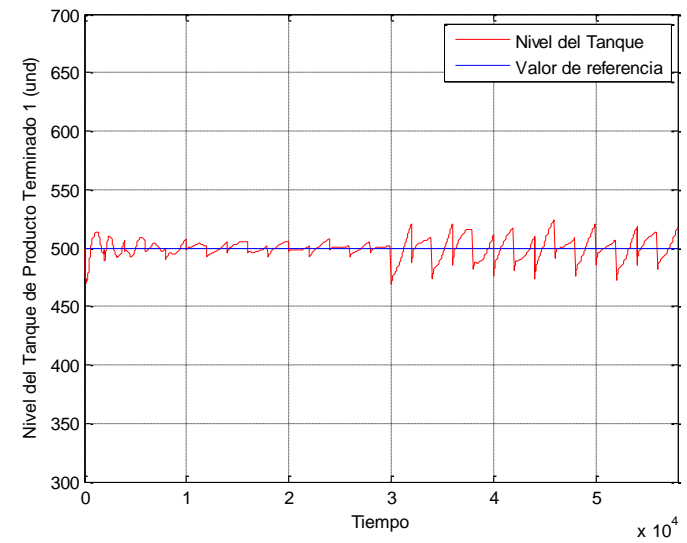


Ilustración 481 Variable PT 1 con DMC en el proceso FFS – D1 – P3.

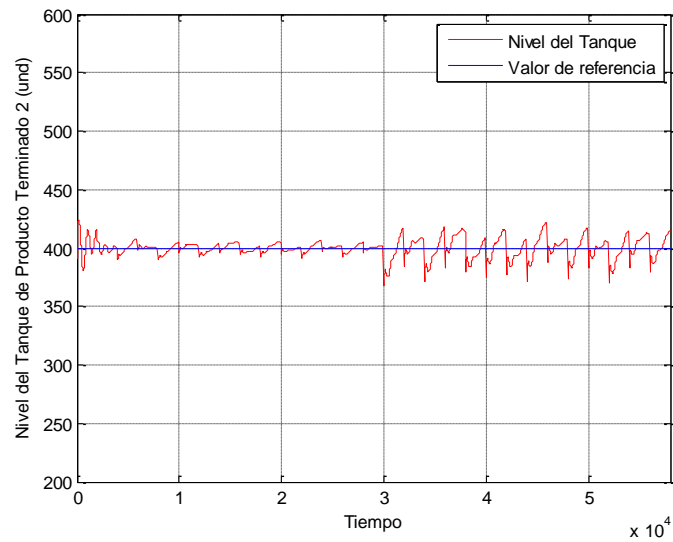


Ilustración 482 Variable PT 2 con DMC en el proceso FFS – D1 – P3.

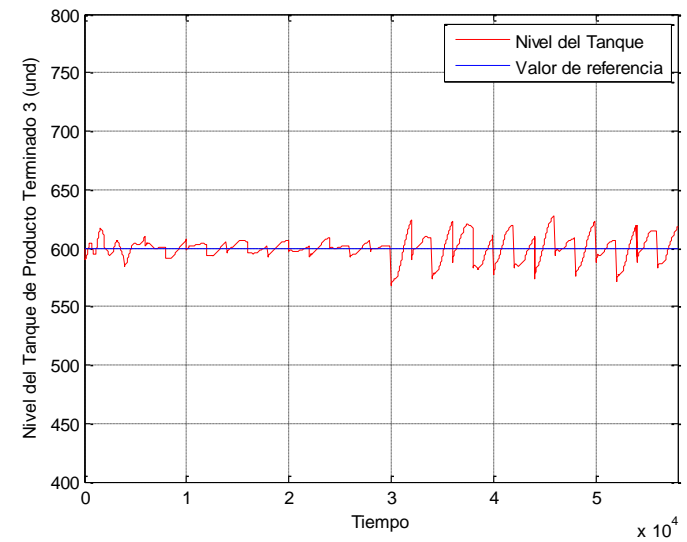


Ilustración 483 Variable PT 3 con DMC en el proceso FFS – D1 – P3.

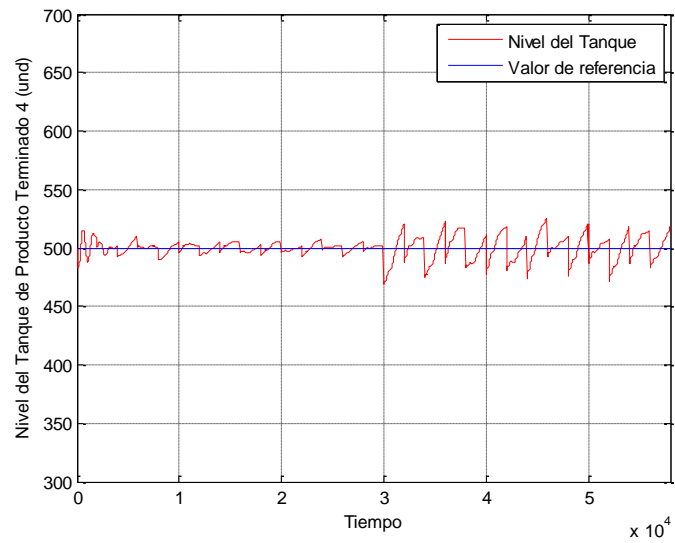


Ilustración 484 Variable PT 4 con DMC en el proceso FFS – D1 – P3.

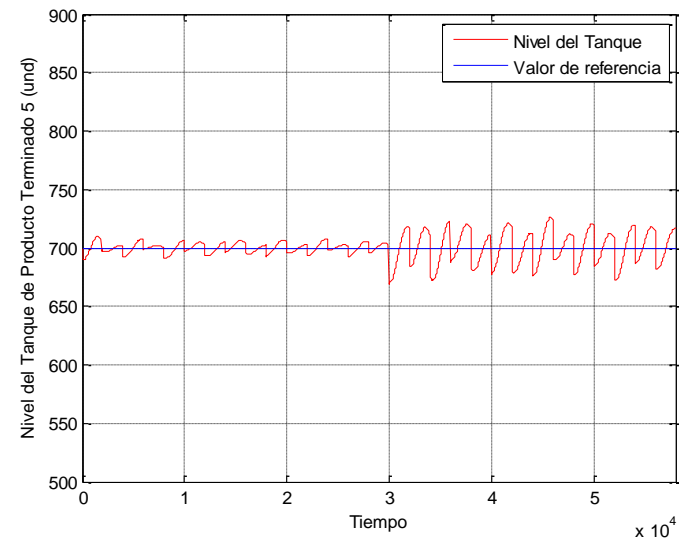


Ilustración 485 Variable PT 5 con DMC en el proceso FFS – D1 – P3.

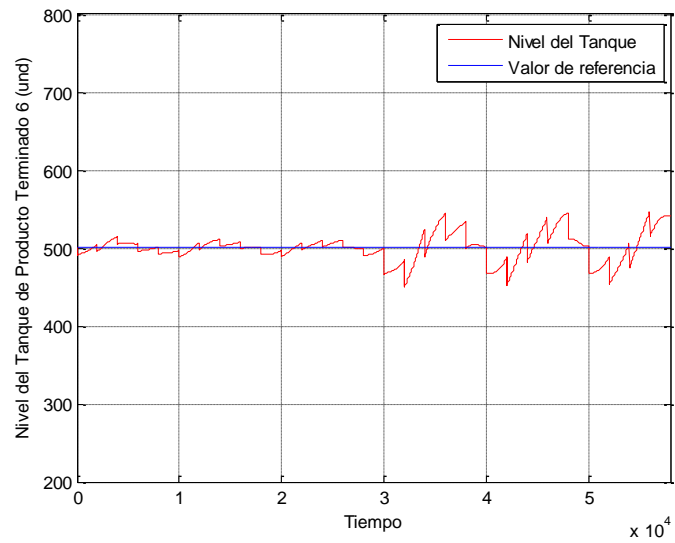


Ilustración 486 Variable PT 6 con DMC en el proceso FFS – D1 – P3.



ANEXO 33. IMPLEMENTACIÓN DMC AL PROCESO FFS CON D2 – P1.

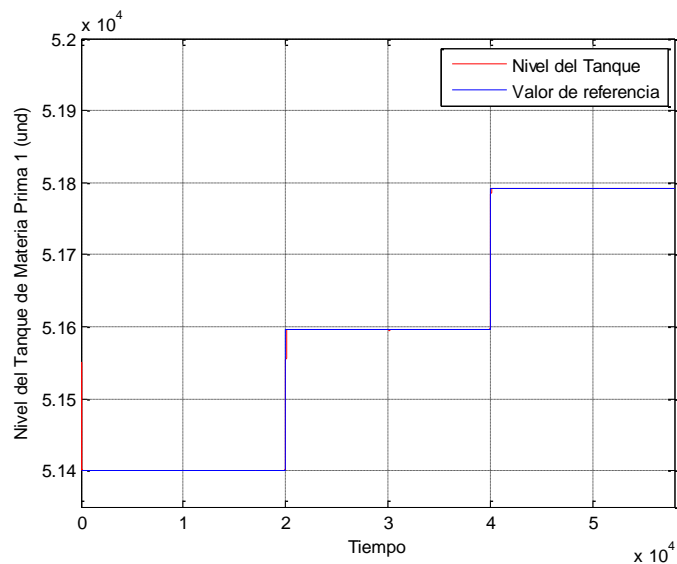


Ilustración 487 Variable MP 1 con DMC en el proceso FFS – D2 – P1.

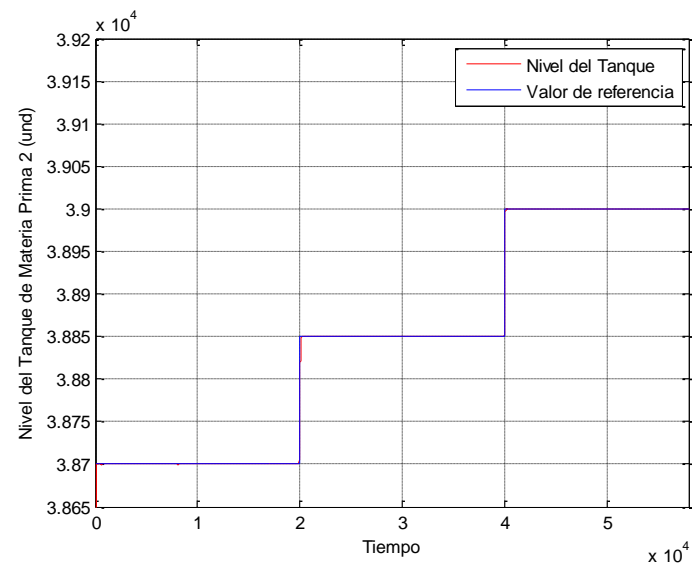


Ilustración 488 Variable MP 2 con DMC en el proceso FFS – D2 – P1.

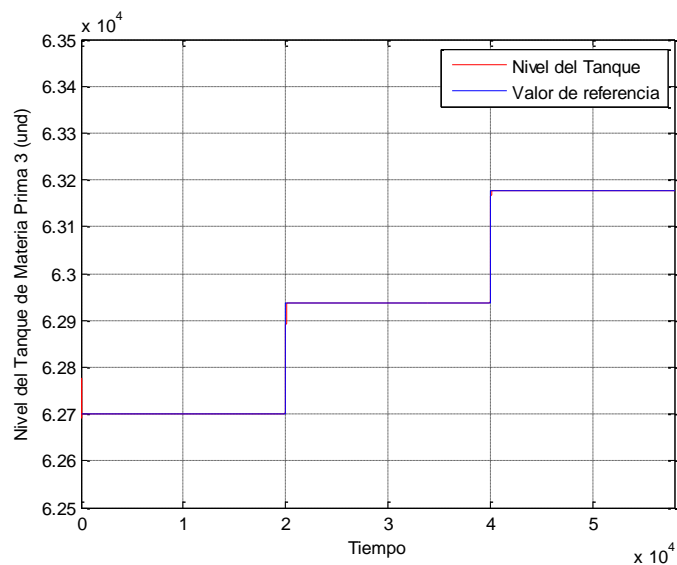


Ilustración 489 Variable MP 3 con DMC en el proceso FFS – D2 – P1.

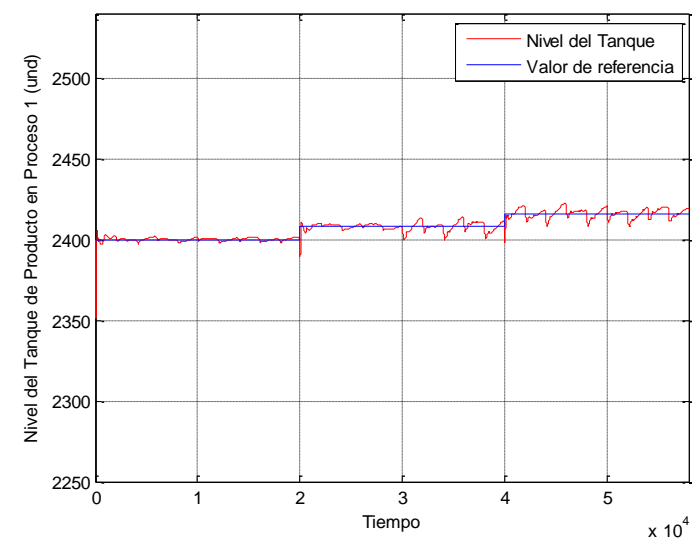


Ilustración 490 Variable PP 1 con DMC en el proceso FFS – D2 – P1.

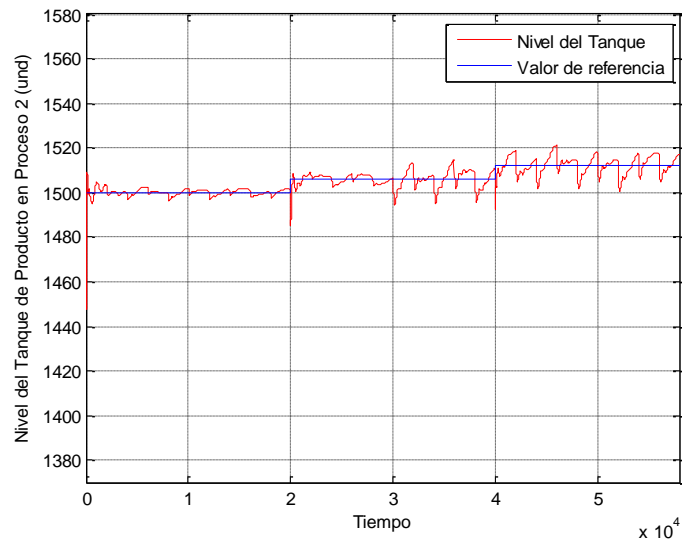


Ilustración 491 Variable PP 2 con DMC en el proceso FFS - D2 - P1.

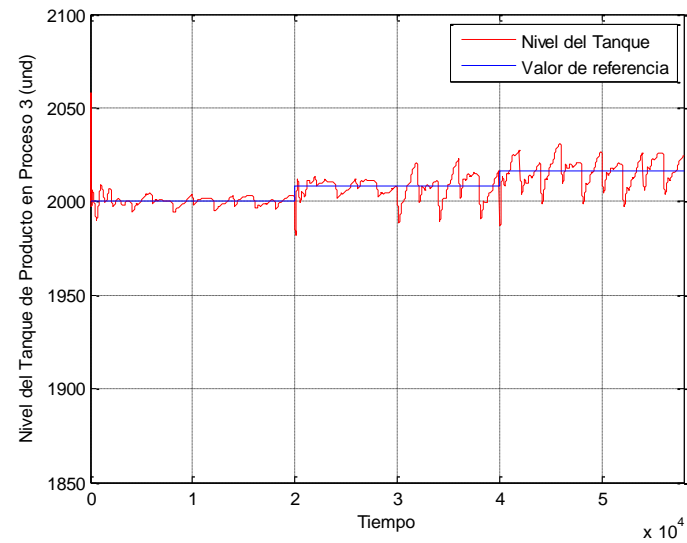


Ilustración 492 Variable PP 3 con DMC en el proceso FFS - D2 - P1.

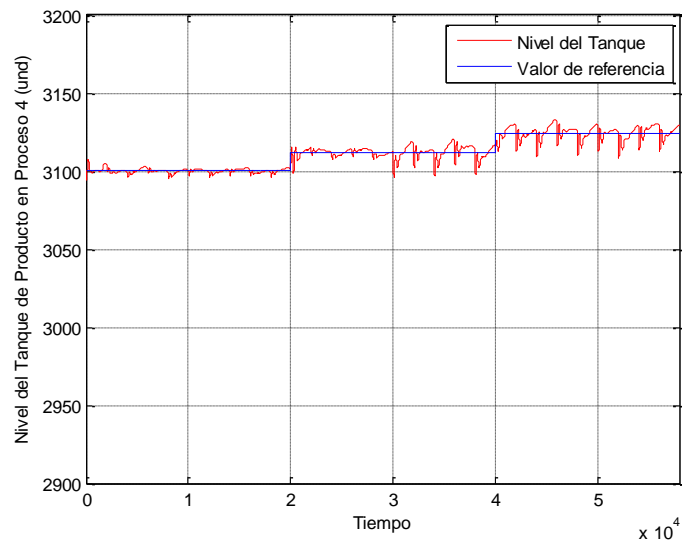


Ilustración 493 Variable PP 4 con DMC en el proceso FFS - D2 - P1.

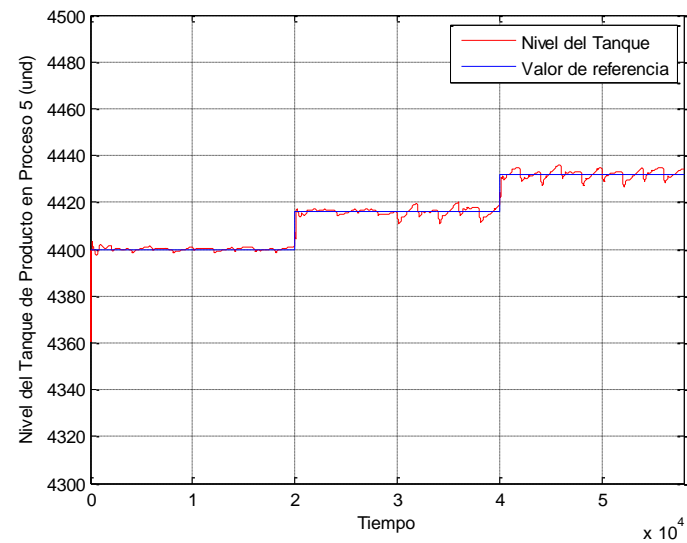


Ilustración 494 Variable PP 5 con DMC en el proceso FFS - D2 - P1.

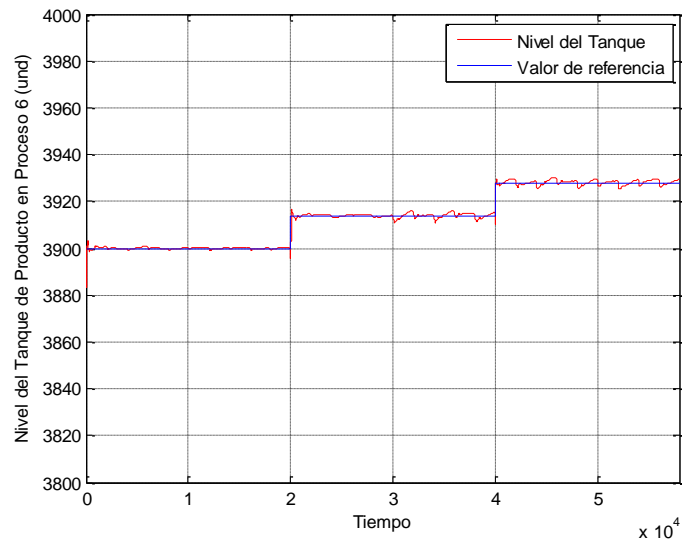


Ilustración 495 Variable PP 6 con DMC en el proceso FFS - D2 - P1.

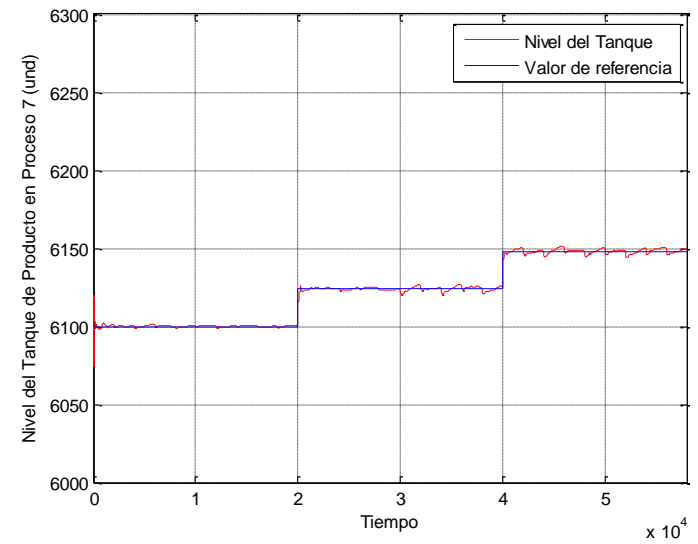


Ilustración 496 Variable PP 7 con DMC en el proceso FFS - D2 - P1.

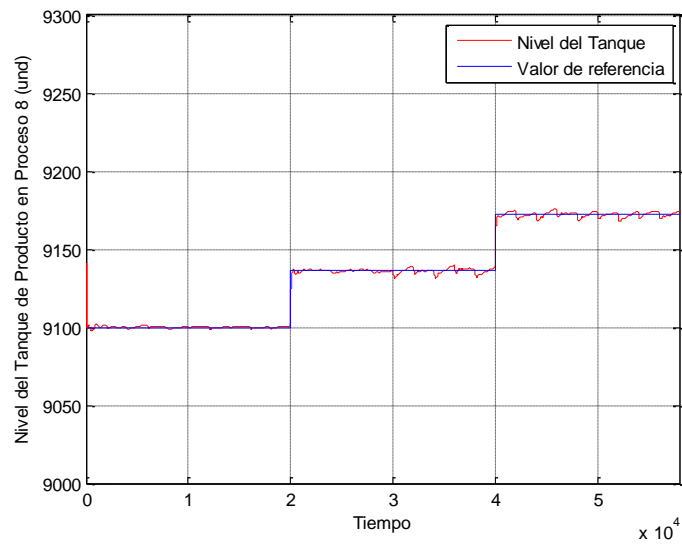


Ilustración 497 Variable PP 8 con DMC en el proceso FFS - D2 - P1.

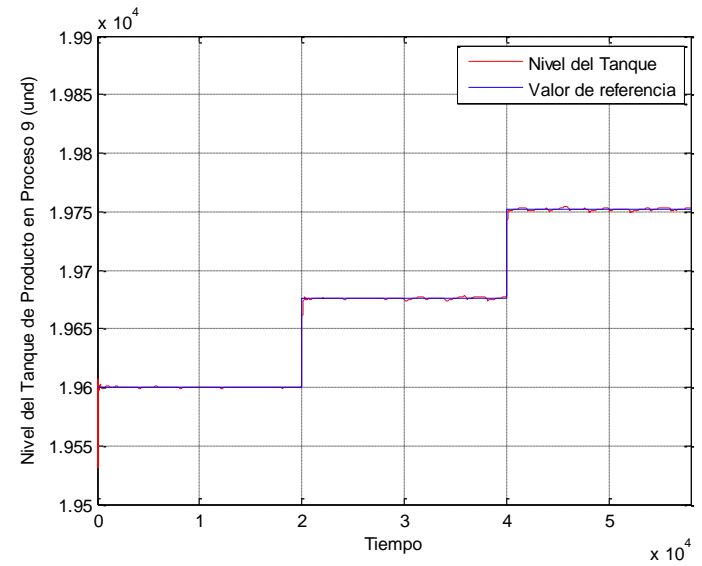


Ilustración 498 Variable PP 9 con DMC en el proceso FFS - D2 - P1.

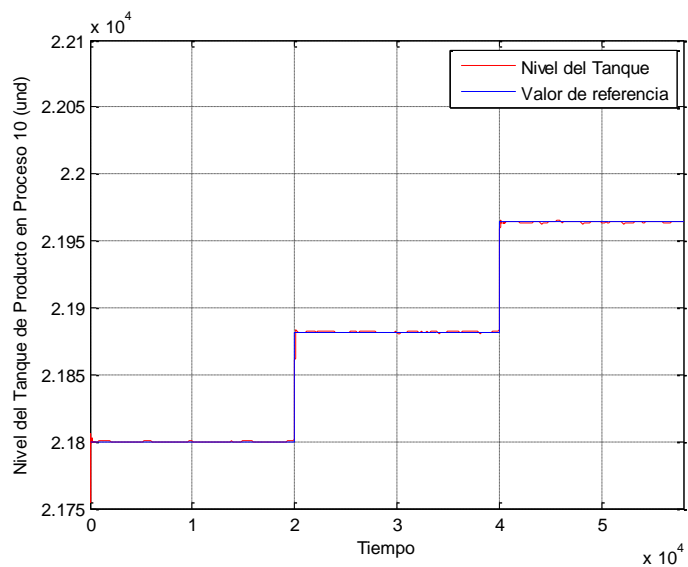


Ilustración 499 Variable PP 10 con DMC en el proceso FFS – D2 – P1.

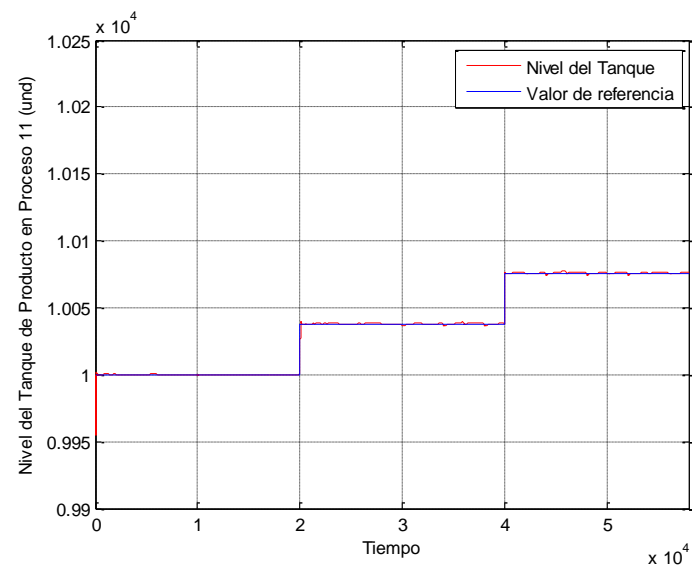


Ilustración 500 Variable PP 11 con DMC en el proceso FFS – D2 – P1.

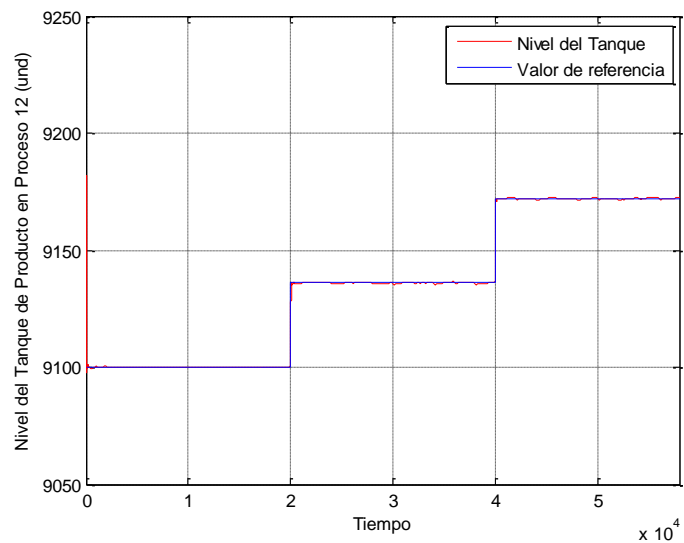


Ilustración 501 Variable PP 12 con DMC en el proceso FFS – D2 – P1.

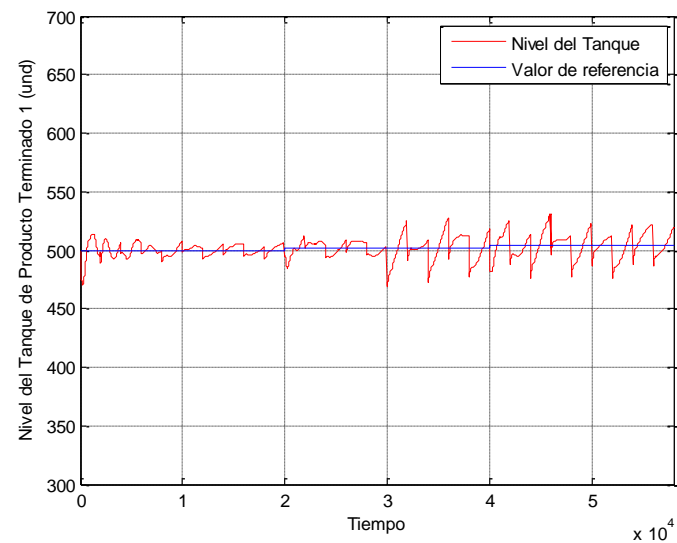


Ilustración 502 Variable PT 1 con DMC en el proceso FFS – D2 – P1.

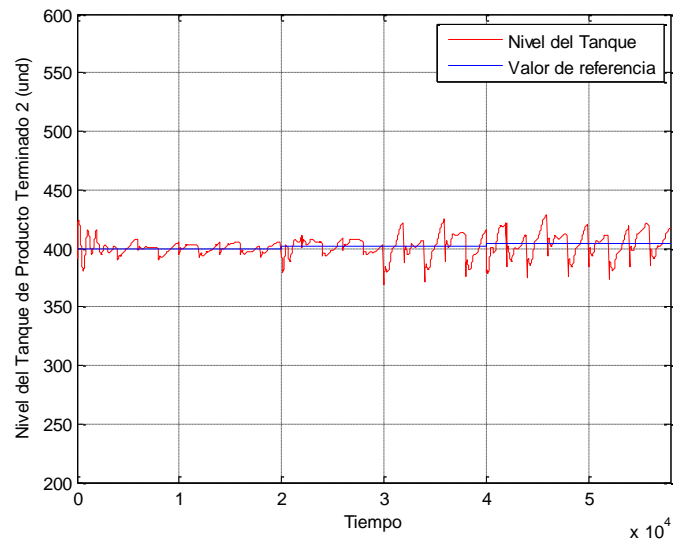


Ilustración 503 Variable PT 2 con DMC en el proceso FFS - D2 - P1.

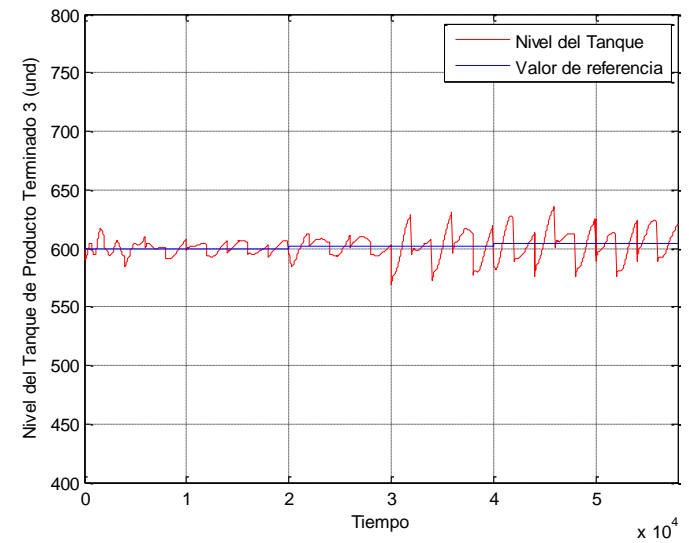


Ilustración 504 Variable PT 3 con DMC en el proceso FFS - D2 - P1.

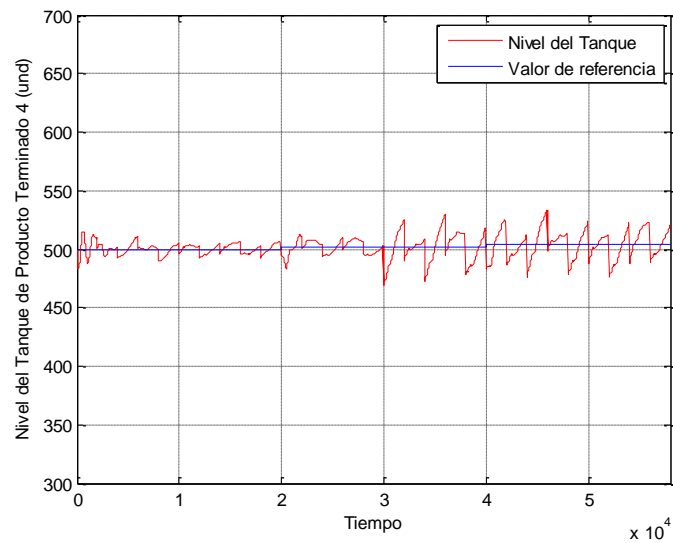


Ilustración 505 Variable PT 4 con DMC en el proceso FFS - D2 - P1.

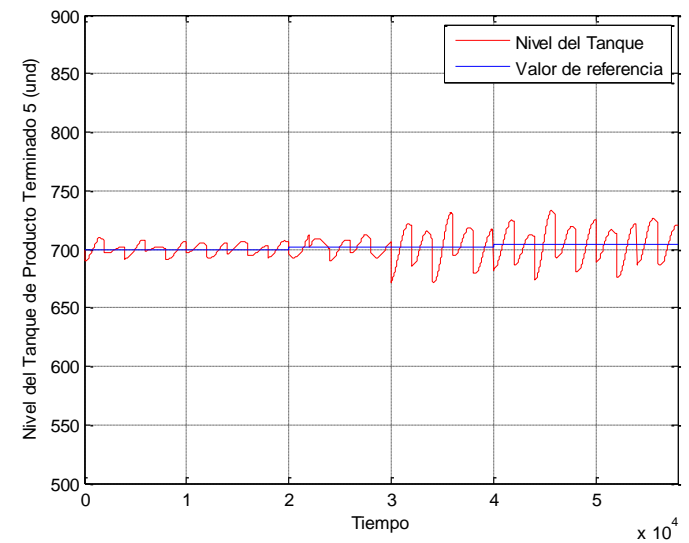


Ilustración 506 Variable PT 5 con DMC en el proceso FFS - D2 - P1.

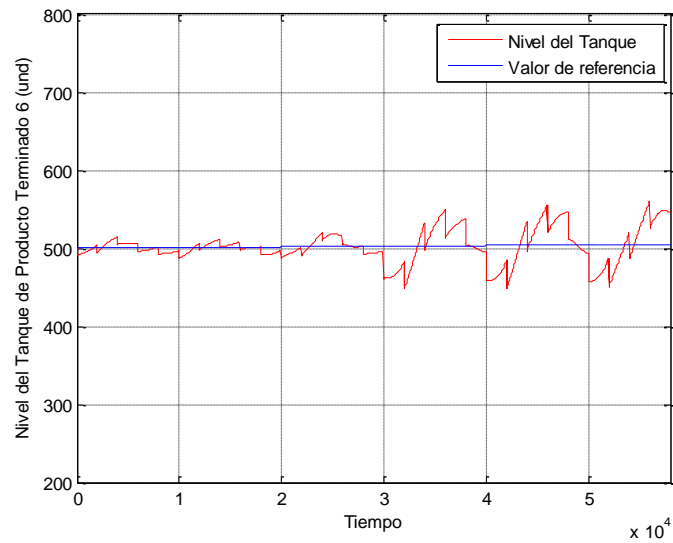


Ilustración 507 Variable PT 6 con DMC en el proceso FFS – D2 – P1.

#### ANEXO 34. IMPLEMENTACIÓN DMC AL PROCESO FFS CON D2 – P2.

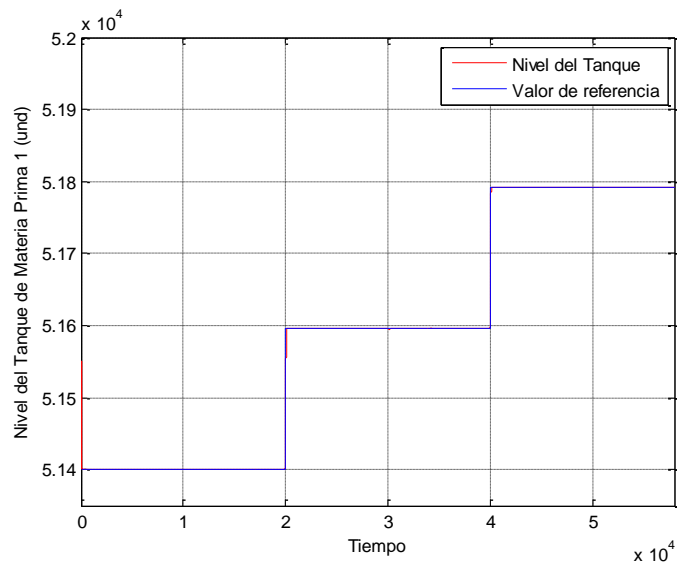


Ilustración 508 Variable MP 1 con DMC en el proceso FFS – D2 – P2.

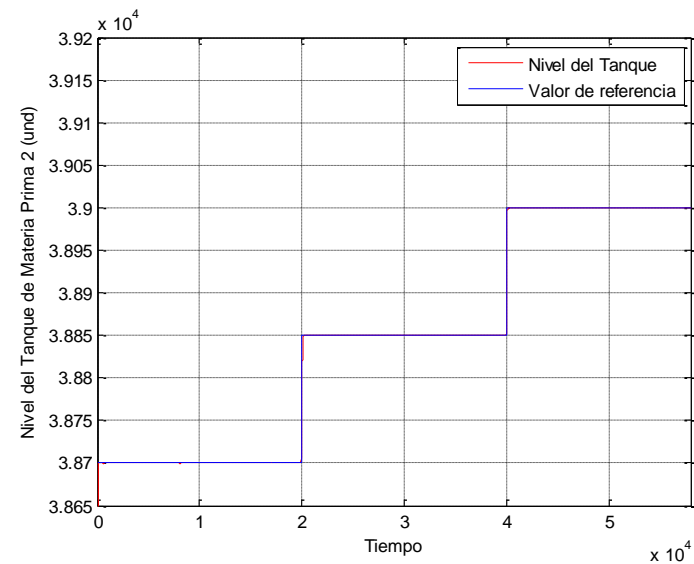


Ilustración 509 Variable MP 2 con DMC en el proceso FFS – D2 – P2.

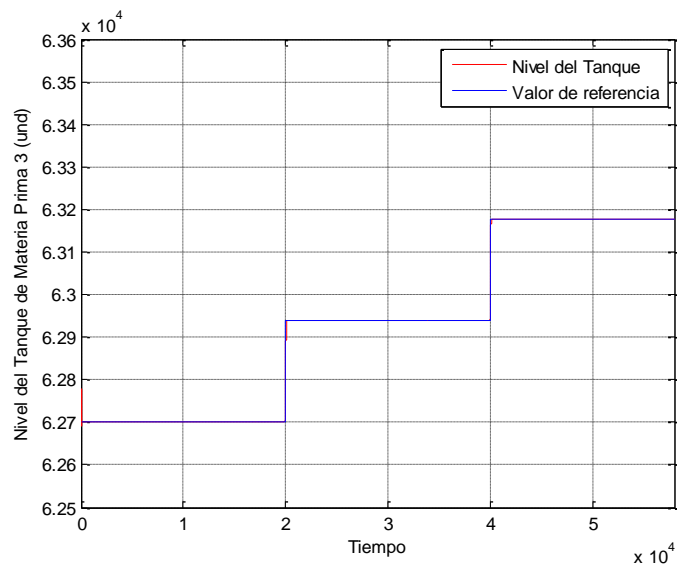


Ilustración 510 Variable MP 3 con DMC en el proceso FFS – D2 – P2.

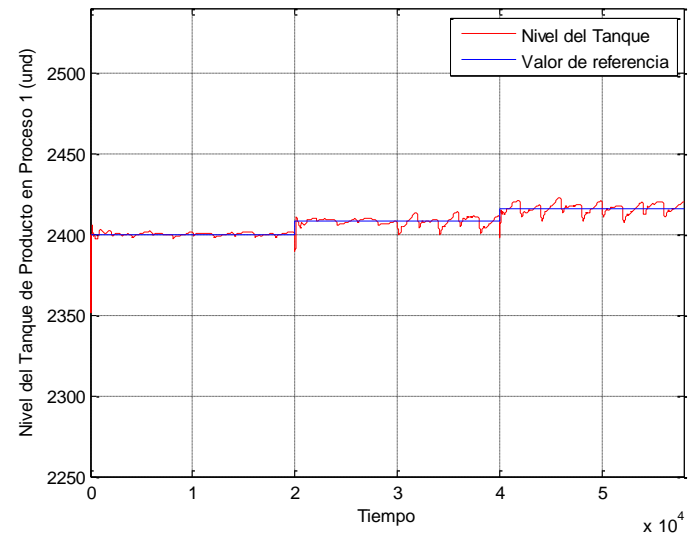


Ilustración 511 Variable PP 1 con DMC en el proceso FFS – D2 – P2.

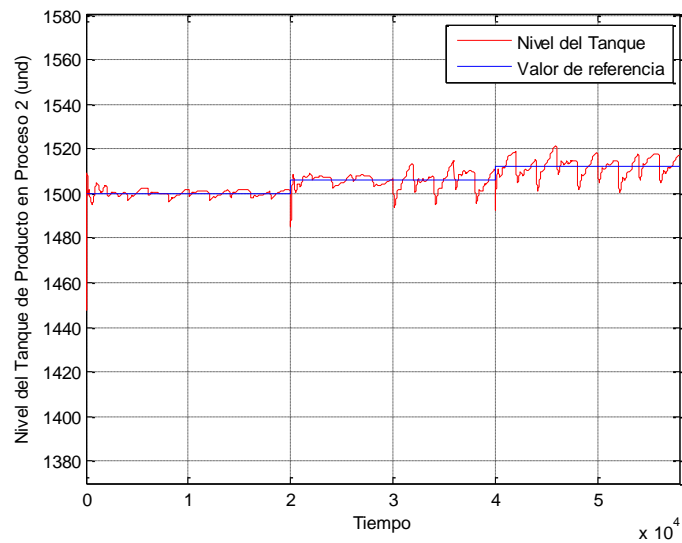


Ilustración 512 Variable PP 2 con DMC en el proceso FFS – D2 – P2.

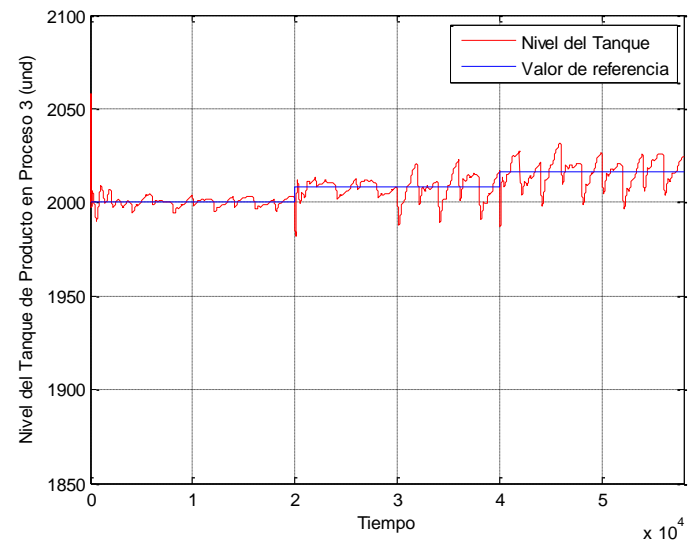


Ilustración 513 Variable PP 3 con DMC en el proceso FFS – D2 – P2.

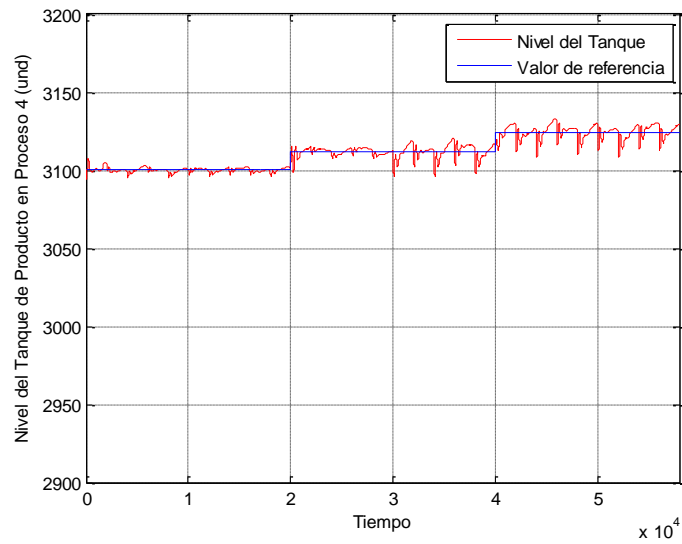


Ilustración 514 Variable PP 4 con DMC en el proceso FFS - D2 - P2.

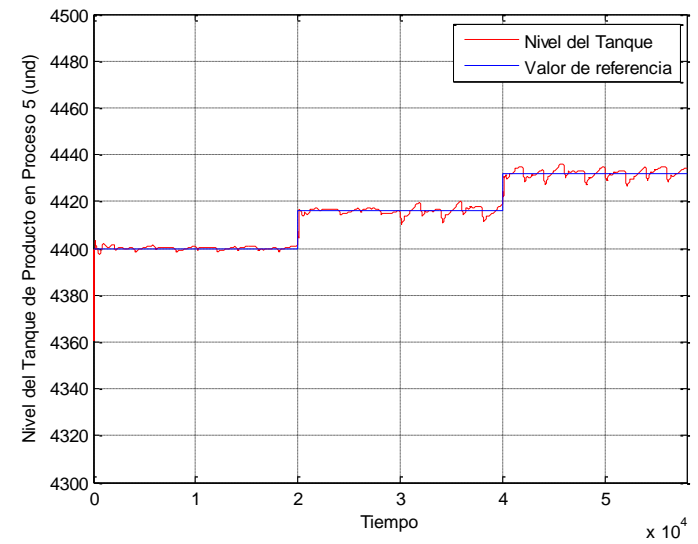


Ilustración 515 Variable PP 5 con DMC en el proceso FFS - D2 - P2.

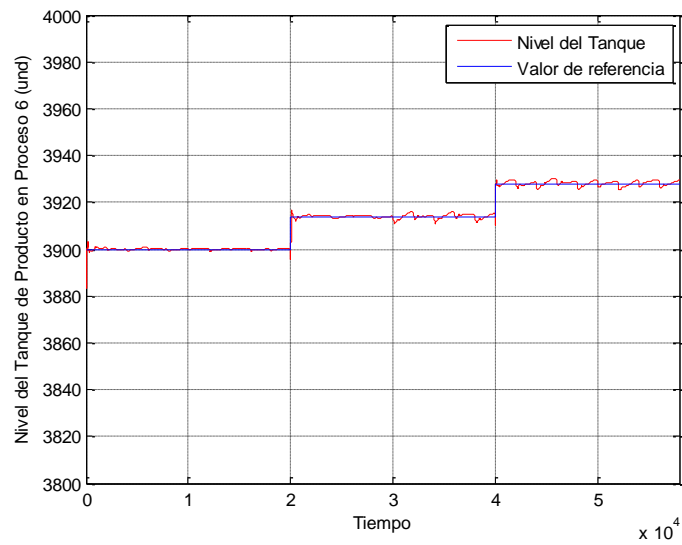


Ilustración 516 Variable PP 6 con DMC en el proceso FFS - D2 - P2.

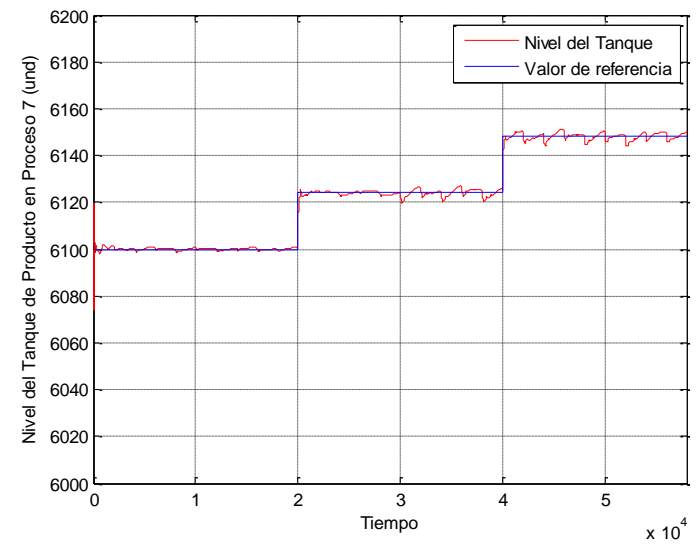


Ilustración 517 Variable PP 7 con DMC en el proceso FFS - D2 - P2.



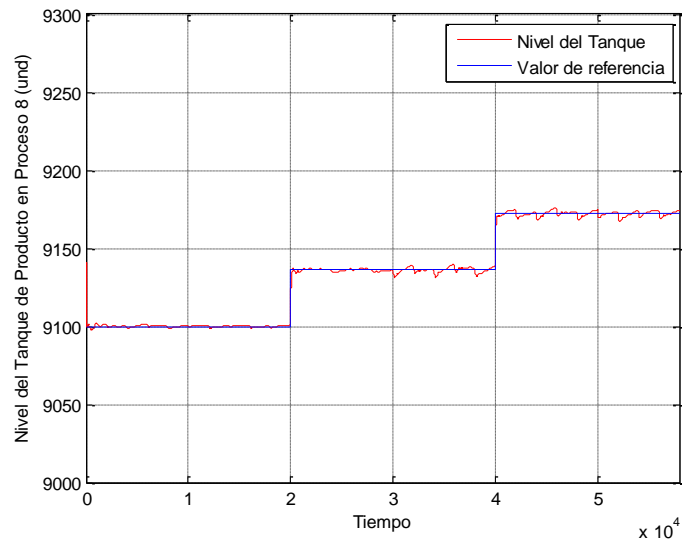


Ilustración 518 Variable PP 8 con DMC en el proceso FFS – D2 – P2.

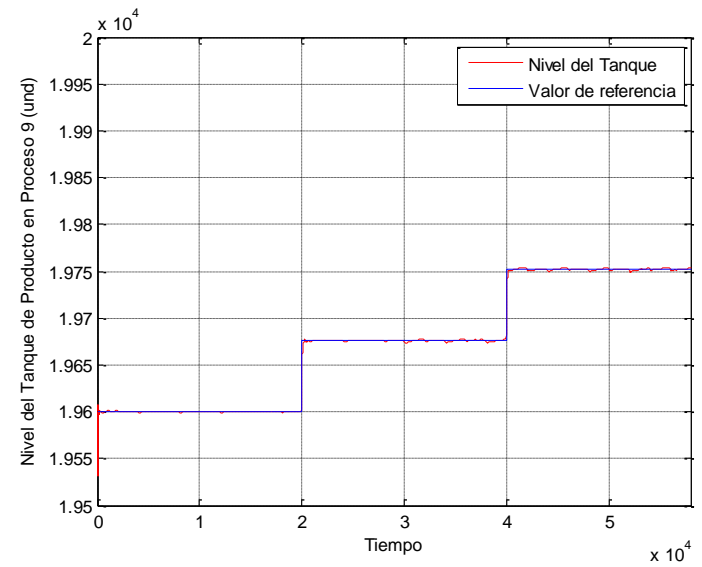


Ilustración 519 Variable PP 9 con DMC en el proceso FFS – D2 – P2.

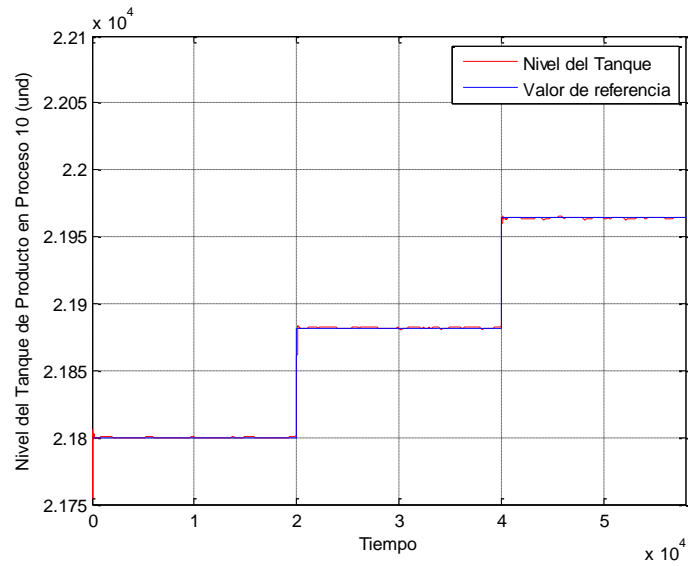


Ilustración 520 Variable PP 10 con DMC en el proceso FFS – D2 – P2.

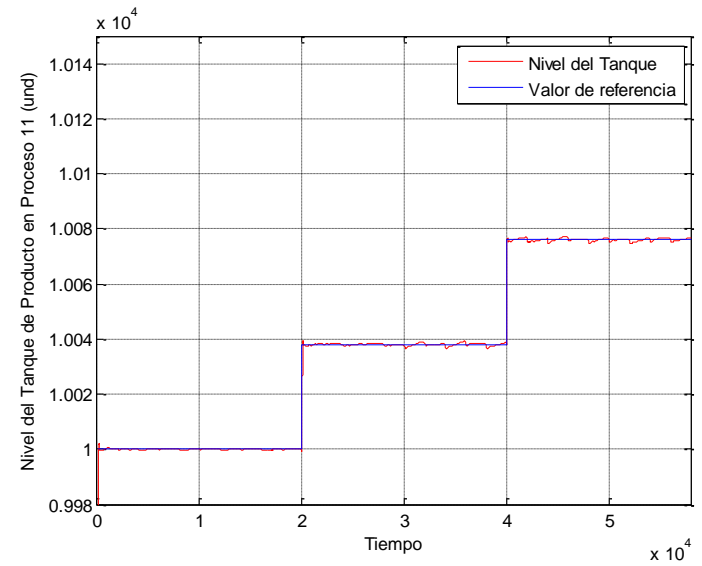


Ilustración 521 Variable PP 11 con DMC en el proceso FFS – D2 – P2.

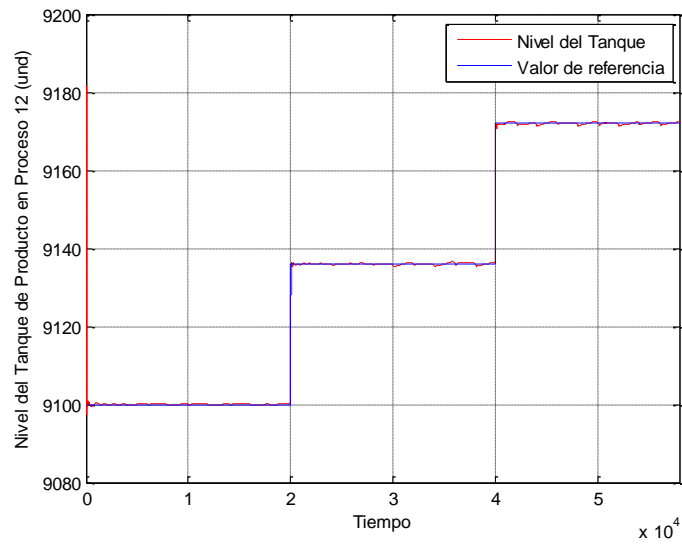


Ilustración 522 Variable PP 12 con DMC en el proceso FFS - D2 - P2.

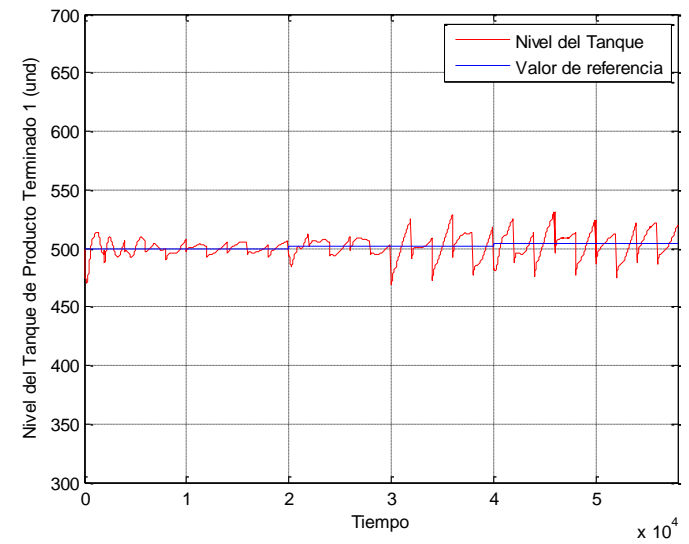


Ilustración 523 Variable PT 1 con DMC en el proceso FFS - D2 - P2.

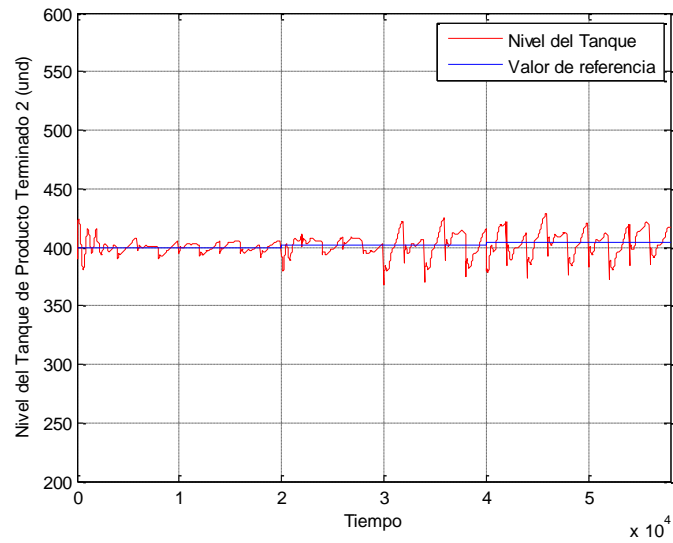


Ilustración 524 Variable PT 2 con DMC en el proceso FFS - D2 - P2.

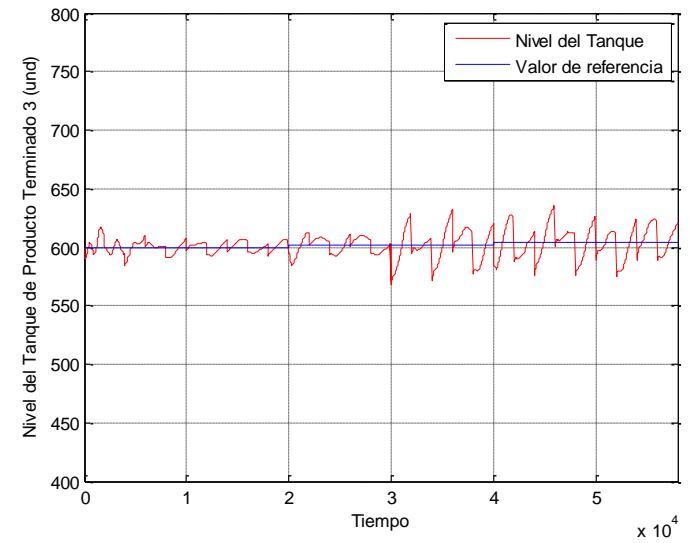


Ilustración 525 Variable PT 3 con DMC en el proceso FFS - D2 - P2.

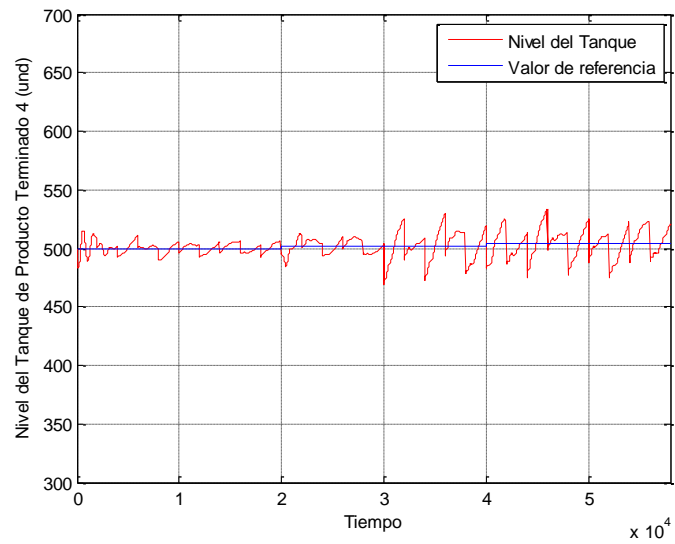


Ilustración 526 Variable PT 4 con DMC en el proceso FFS – D2 – P2.

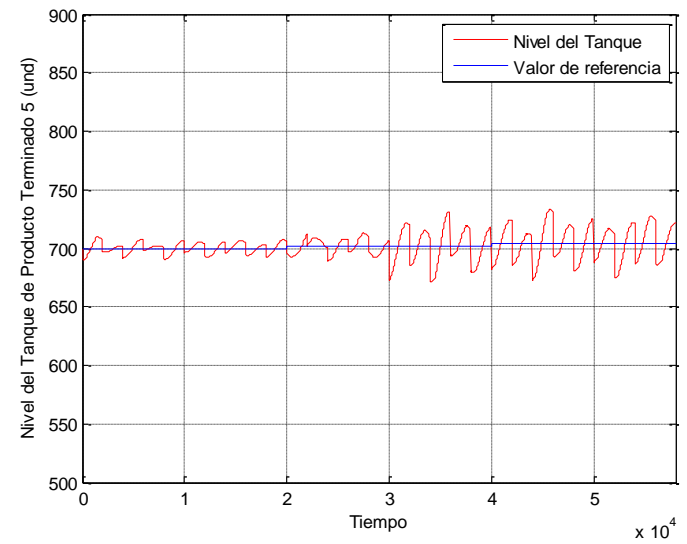


Ilustración 527 Variable PT 5 con DMC en el proceso FFS – D2 – P2.

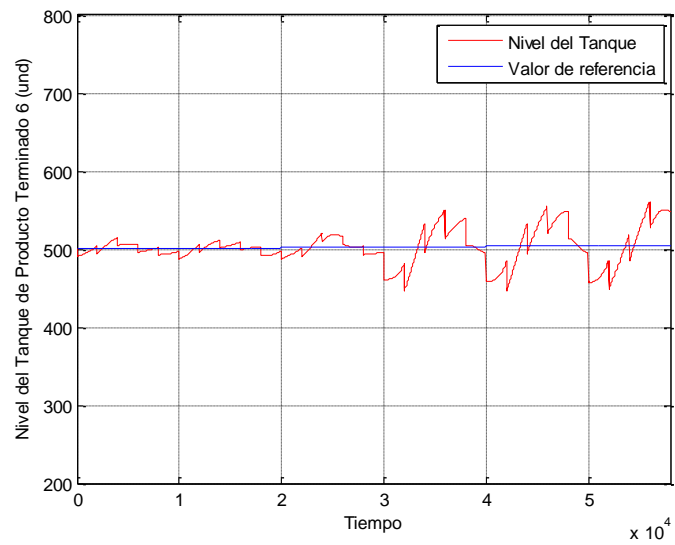


Ilustración 528 Variable PT 6 con DMC en el proceso FFS – D2 – P2.

ANEXO 35. IMPLEMENTACIÓN DMC AL PROCESO FFS CON D2 – P3.

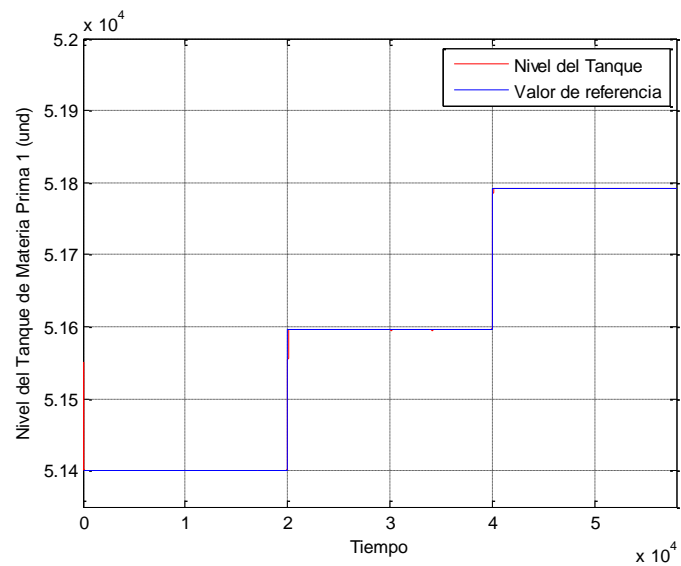


Ilustración 529 Variable MP 1 con DMC en el proceso FFS – D2 – P3.

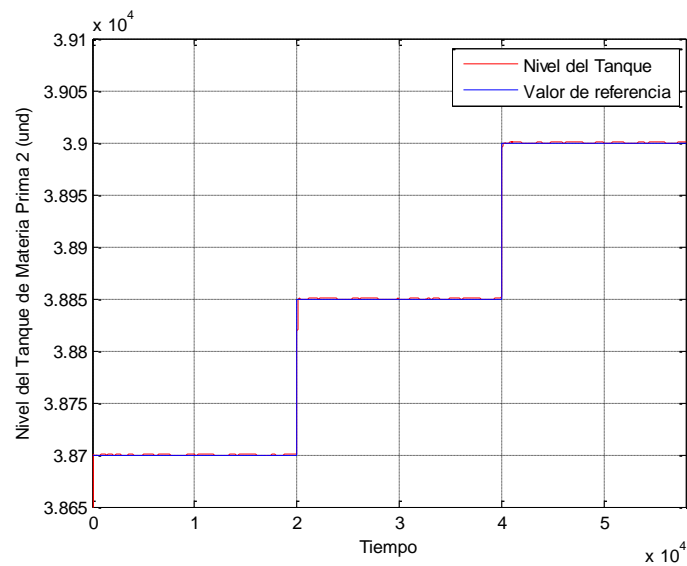


Ilustración 530 Variable MP 2 con DMC en el proceso FFS – D2 – P3.

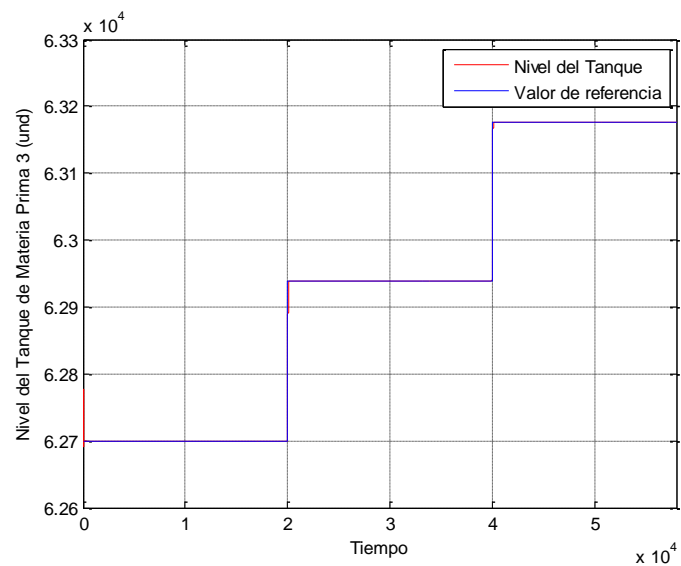


Ilustración 531 Variable MP 3 con DMC en el proceso FFS – D2 – P3.

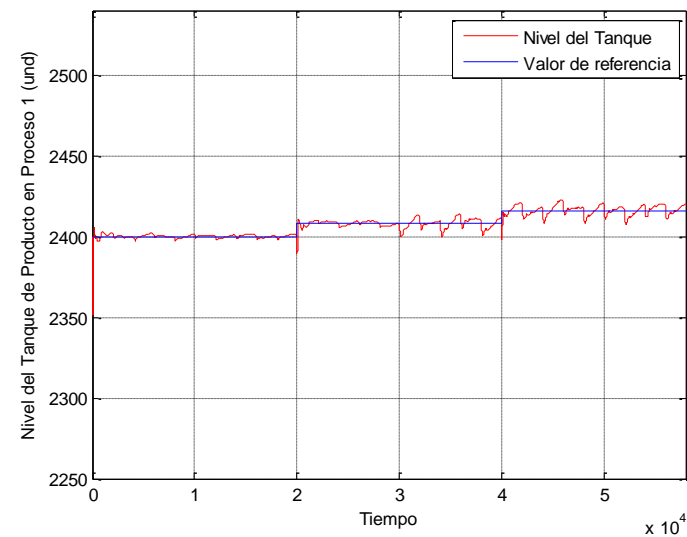


Ilustración 532 Variable PP 1 con DMC en el proceso FFS – D2 – P3.

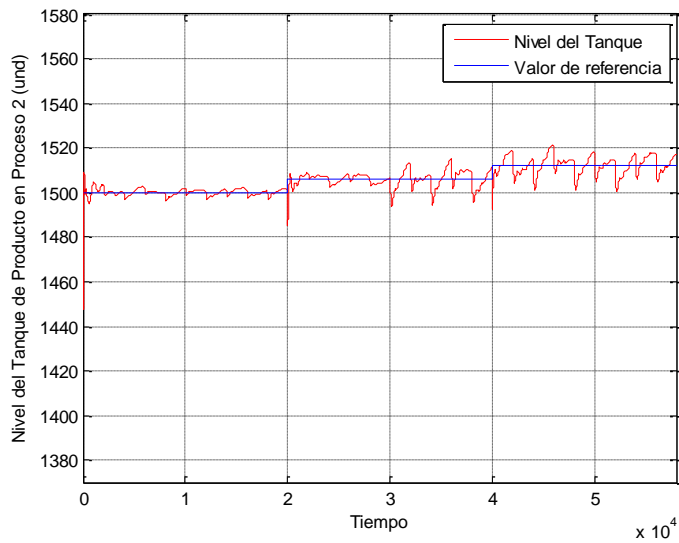


Ilustración 533 Variable PP 2 con DMC en el proceso FFS – D2 – P3.

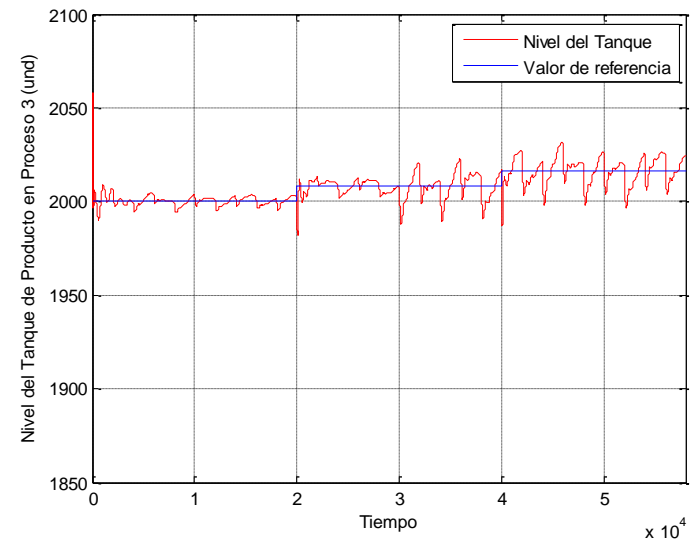


Ilustración 534 Variable PP 3 con DMC en el proceso FFS – D2 – P3.

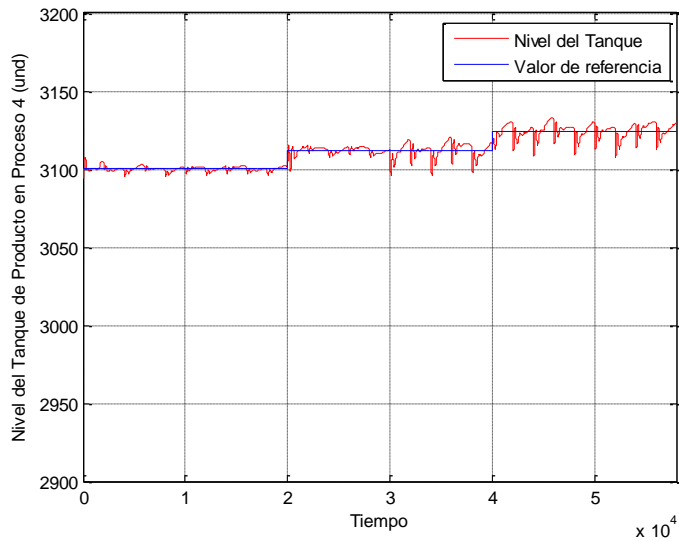


Ilustración 535 Variable PP 4 con DMC en el proceso FFS – D2 – P3.

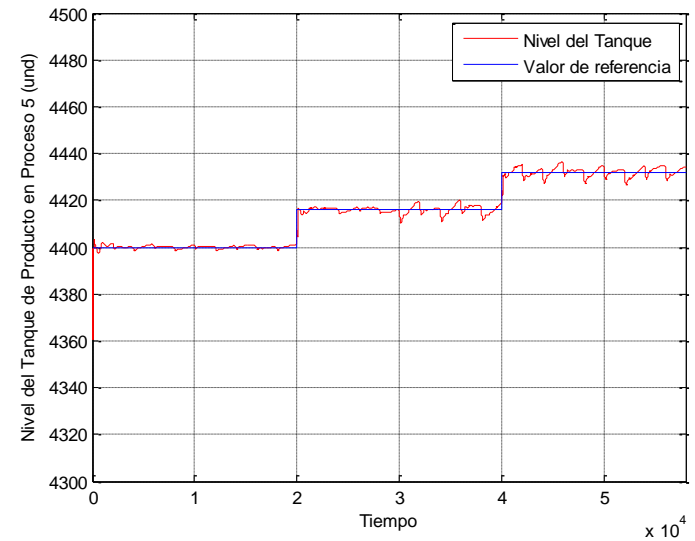


Ilustración 536 Variable PP 5 con DMC en el proceso FFS – D2 – P3.

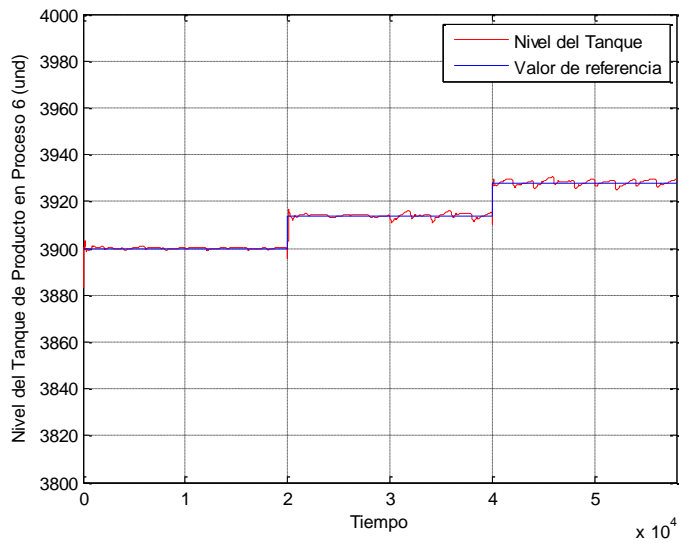


Ilustración 537 Variable PP 6 con DMC en el proceso FFS – D2 – P3.

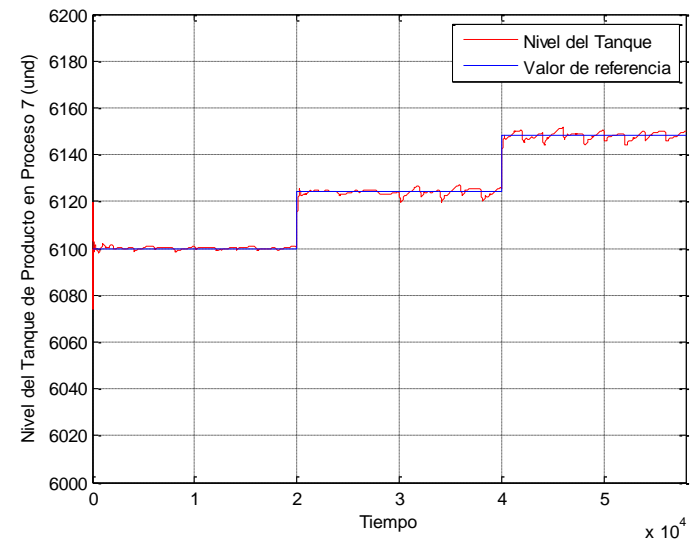


Ilustración 538 Variable PP 7 con DMC en el proceso FFS – D2 – P3.

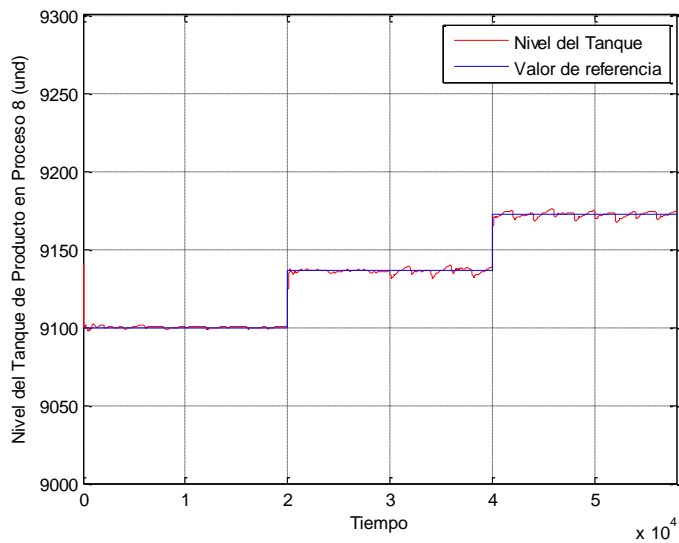


Ilustración 539 Variable PP 8 con DMC en el proceso FFS – D2 – P3.

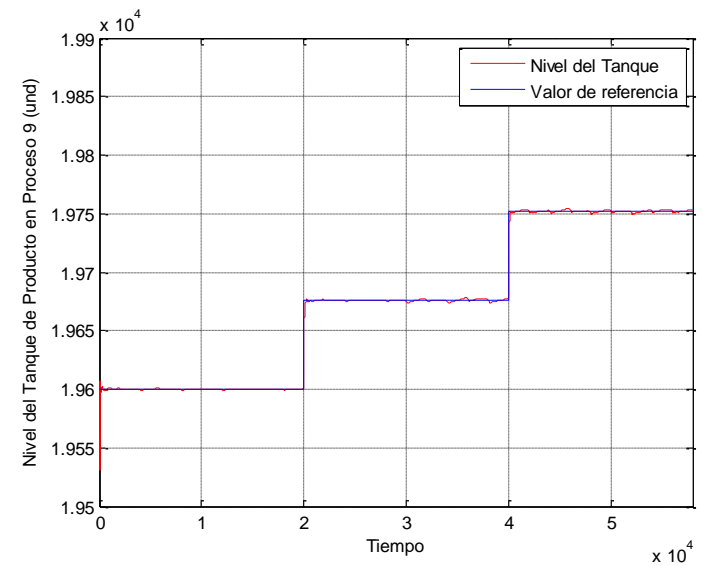


Ilustración 540 Variable PP 9 con DMC en el proceso FFS – D2 – P3.

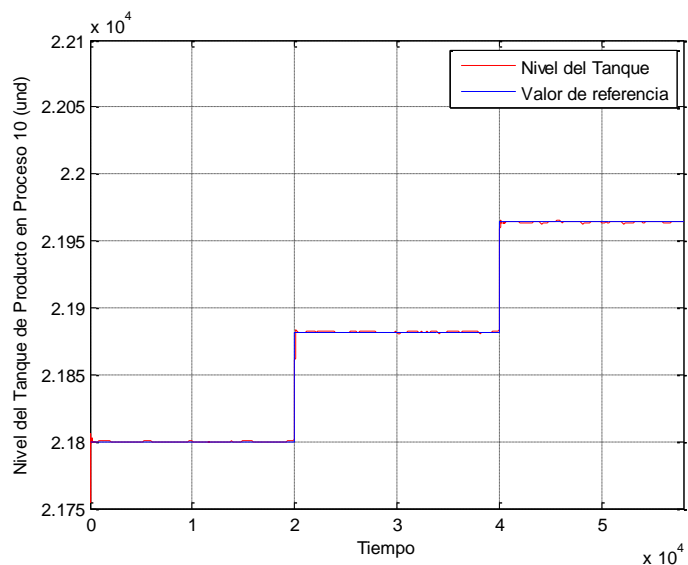


Ilustración 541 Variable PP 10 con DMC en el proceso FFS – D2 – P3.

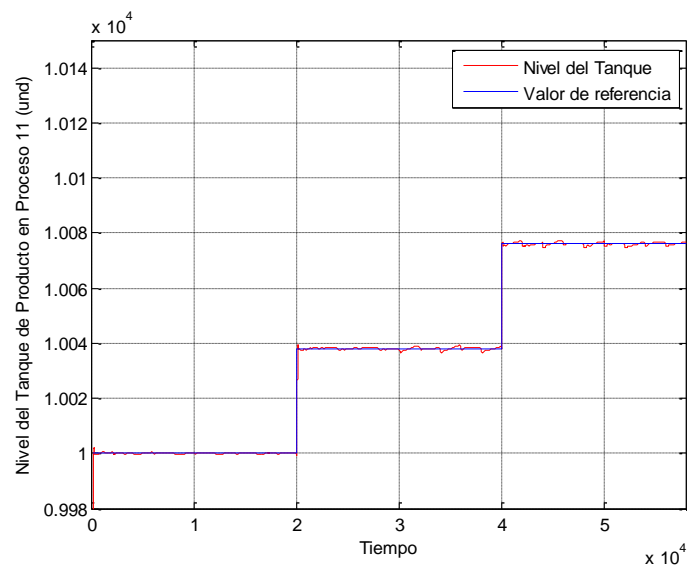


Ilustración 542 Variable PP 11 con DMC en el proceso FFS – D2 – P3.

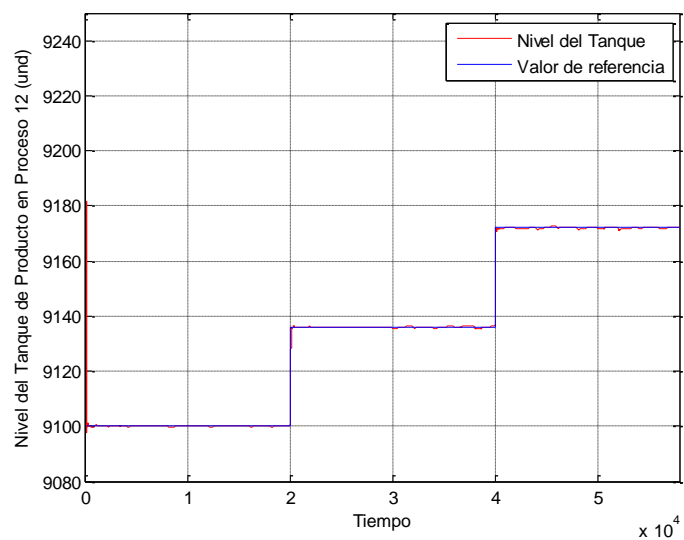


Ilustración 543 Variable PP 12 con DMC en el proceso FFS – D2 – P3.

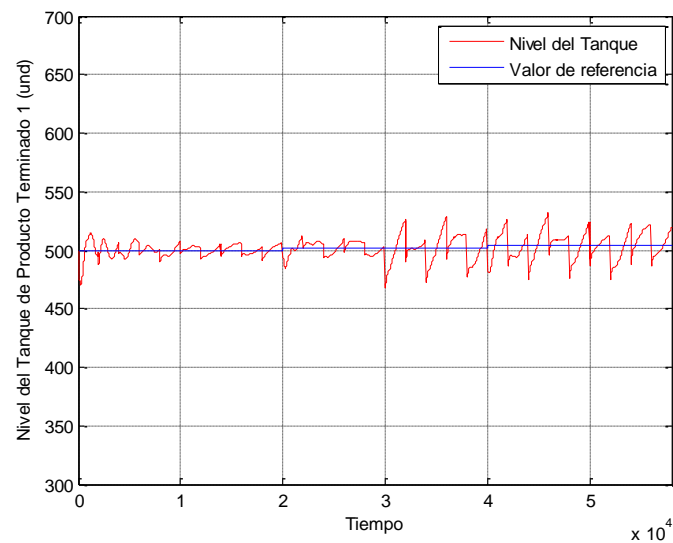


Ilustración 544 Variable PT 1 con DMC en el proceso FFS – D2 – P3.

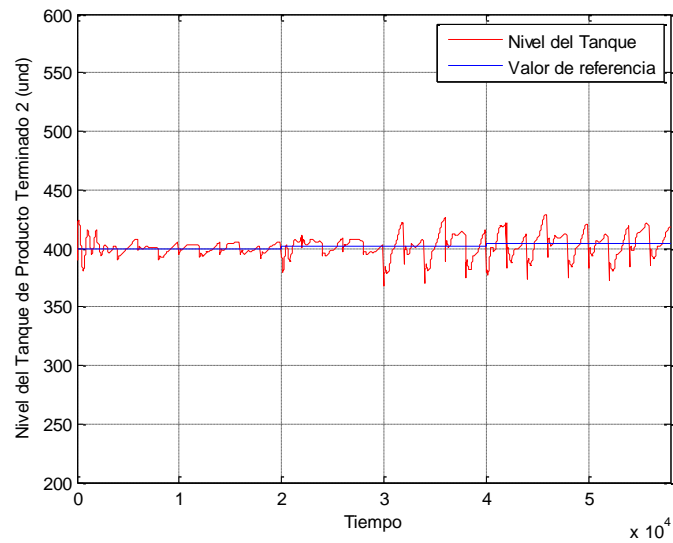


Ilustración 545 Variable PT 2 con DMC en el proceso FFS – D2 – P3.

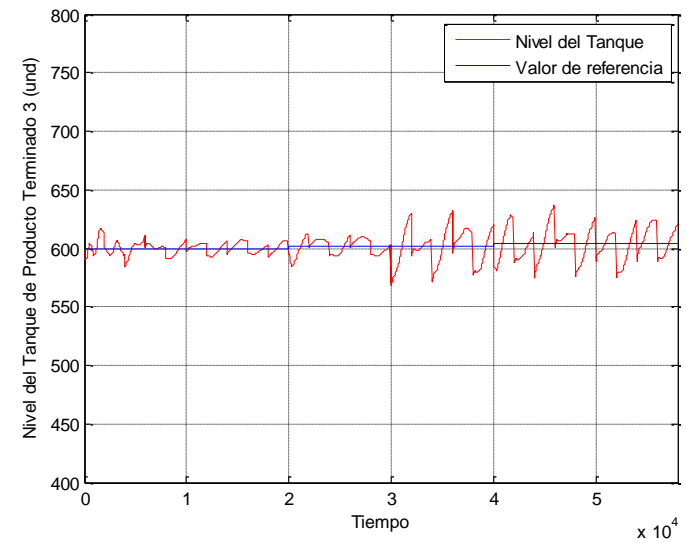


Ilustración 546 Variable PT 3 con DMC en el proceso FFS – D2 – P3.

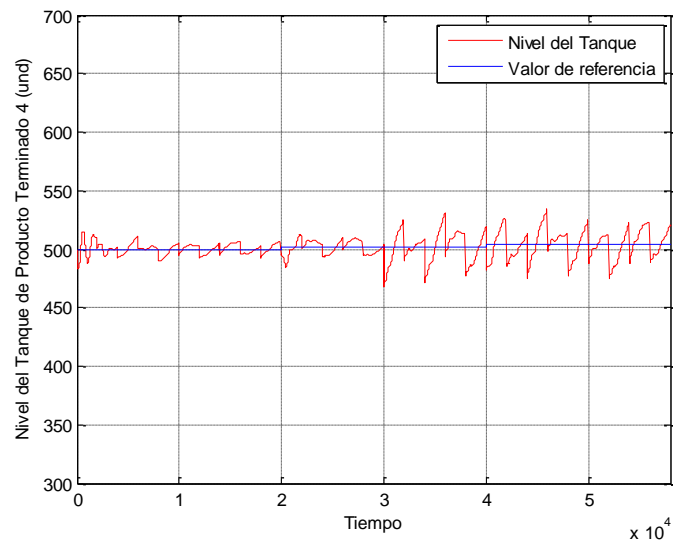


Ilustración 547 Variable PT 4 con DMC en el proceso FFS – D2 – P3.

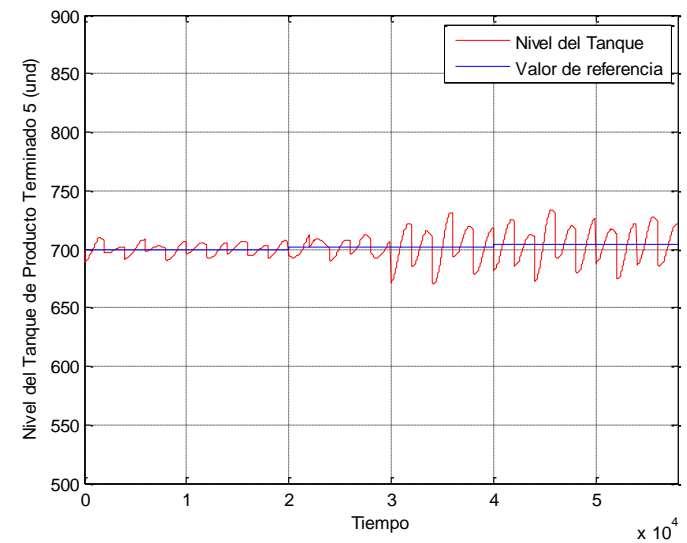


Ilustración 548 Variable PT 5 con DMC en el proceso FFS – D2 – P3.



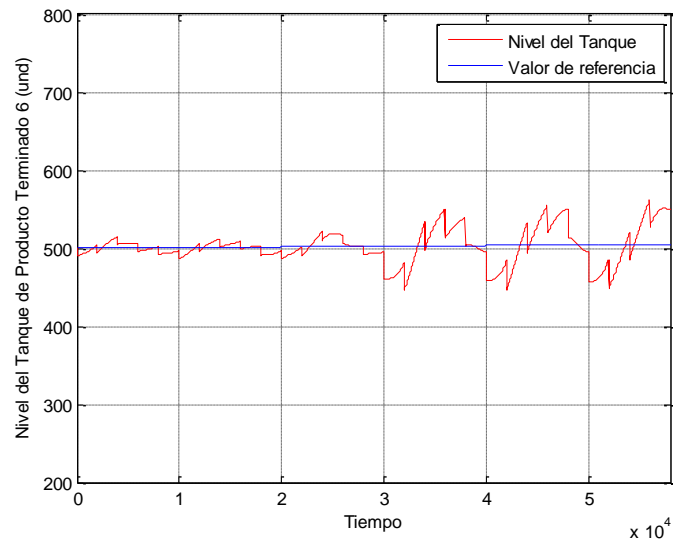


Ilustración 549 Variable PT 6 con DMC en el proceso FFS – D2 – P3.

#### ANEXO 36. IMPLEMENTACIÓN DMC AL PROCESO FFS CON D3 – P1.

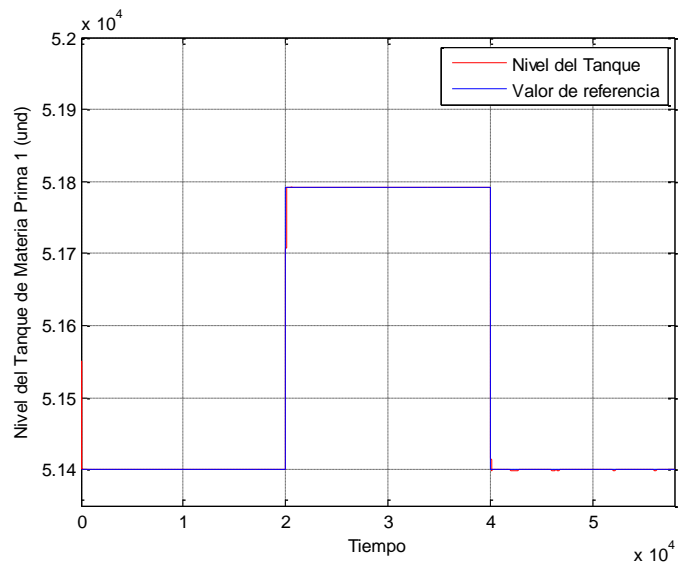


Ilustración 550 Variable MP 1 con DMC en el proceso FFS – D3 – P1.

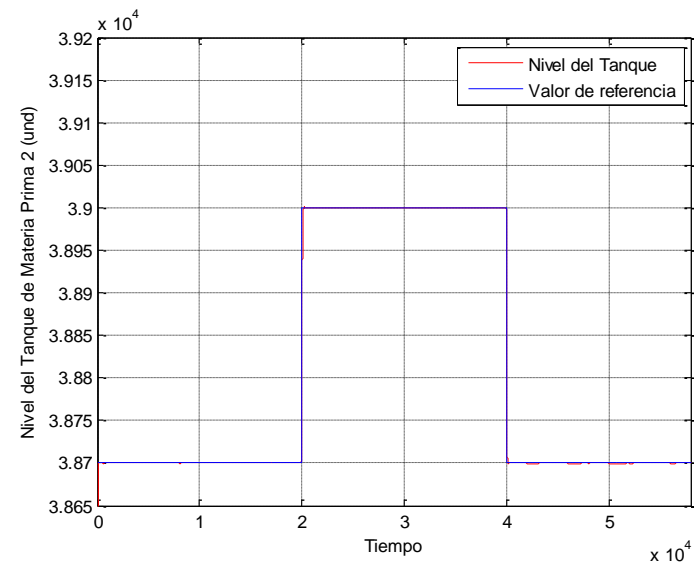


Ilustración 551 Variable MP 2 con DMC en el proceso FFS – D3 – P1

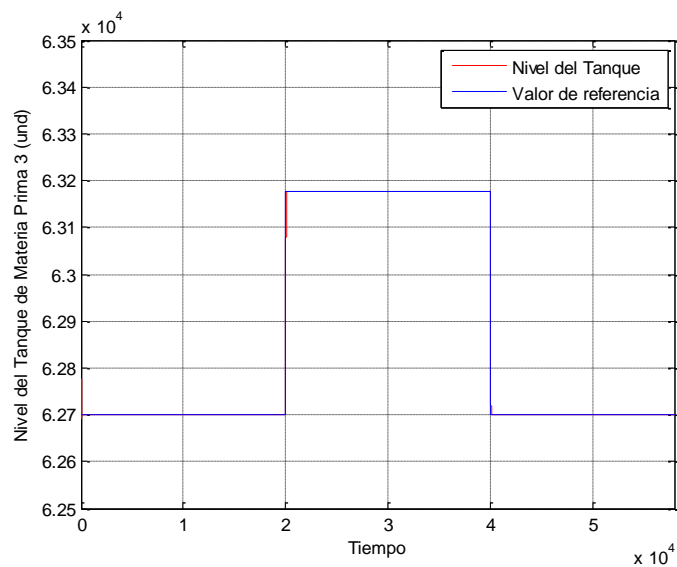


Ilustración 552 Variable MP 3 con DMC en el proceso FFS – D3 – P1.

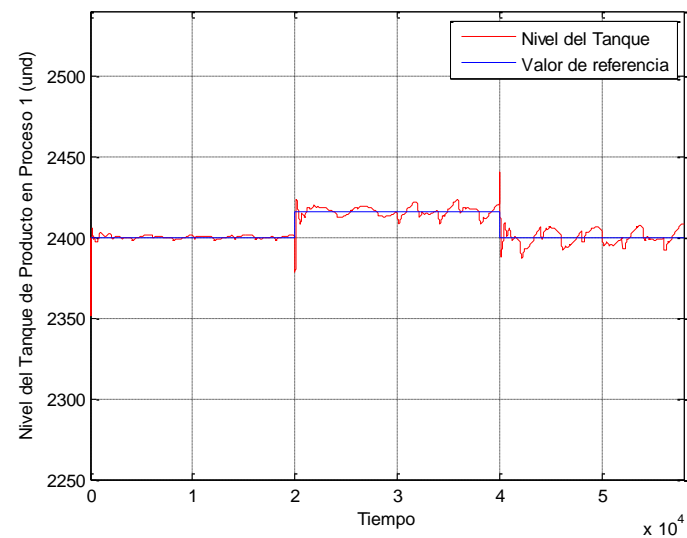


Ilustración 553 Variable PP 1 con DMC en el proceso FFS – D3 – P1.

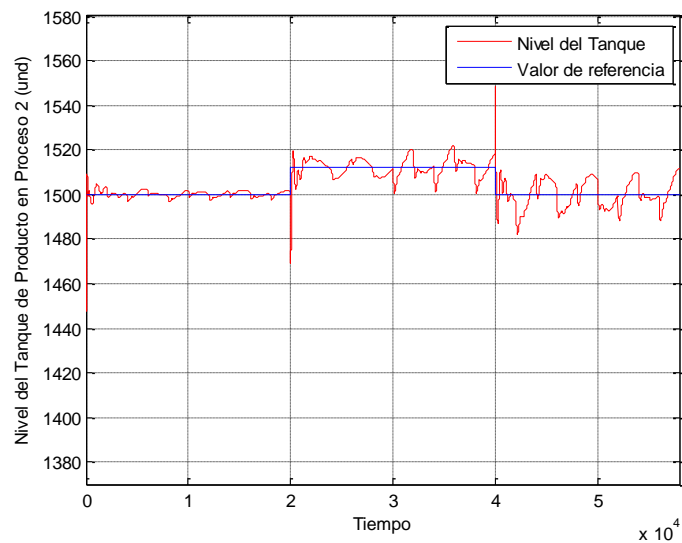


Ilustración 554 Variable PP 2 con DMC en el proceso FFS – D3 – P1.

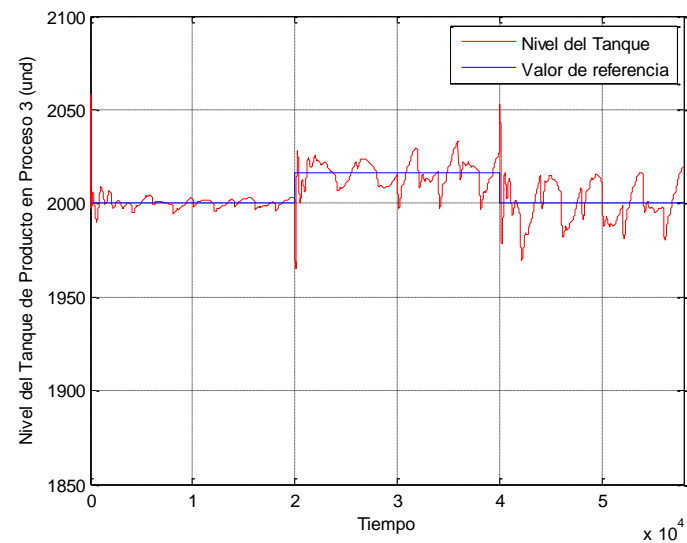


Ilustración 555 Variable PP 3 con DMC en el proceso FFS – D3 – P1.

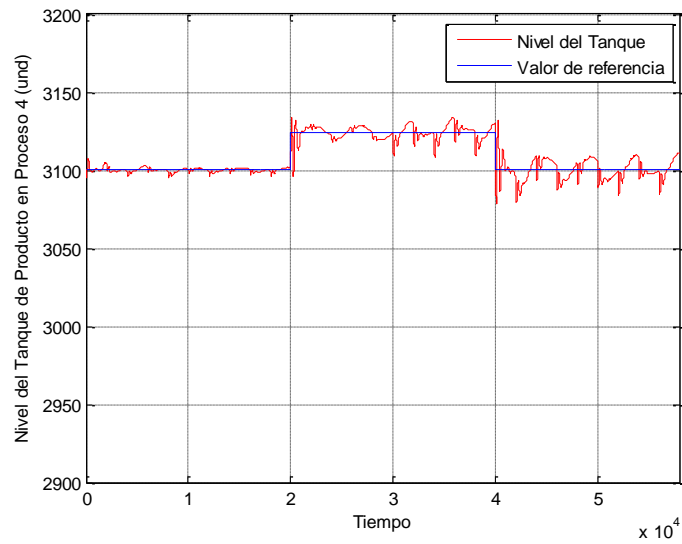


Ilustración 556 Variable PP 4 con DMC en el proceso FFS - D3 - P1.

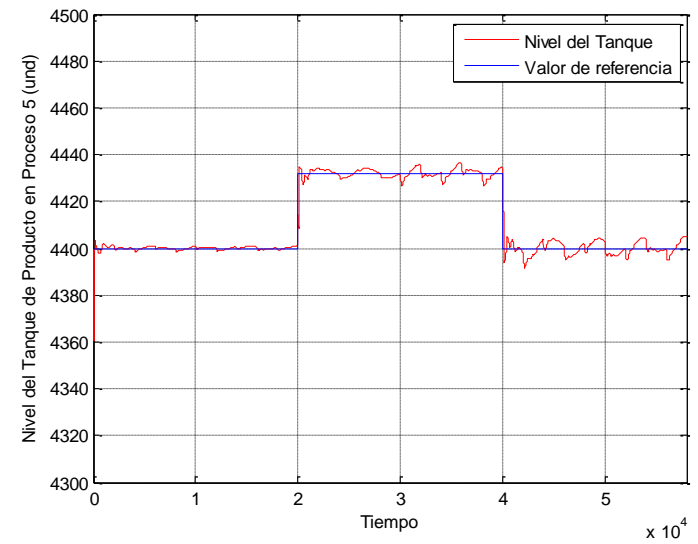


Ilustración 557 Variable PP 5 con DMC en el proceso FFS - D3 - P1.

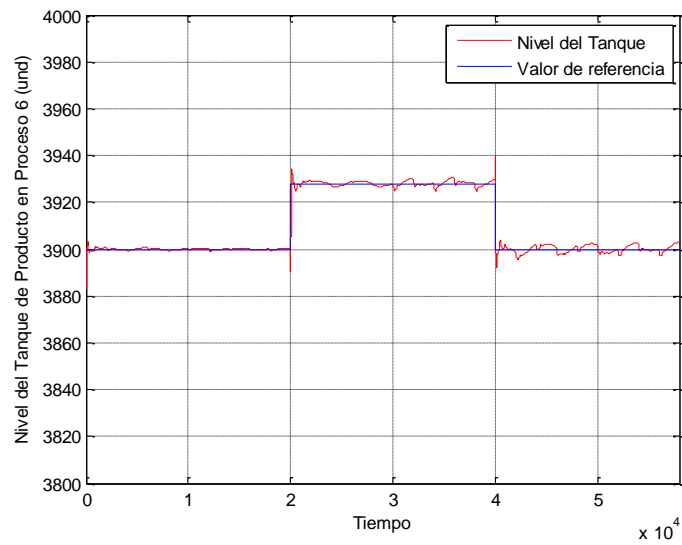


Ilustración 558 Variable PP 6 con DMC en el proceso FFS - D3 - P1.

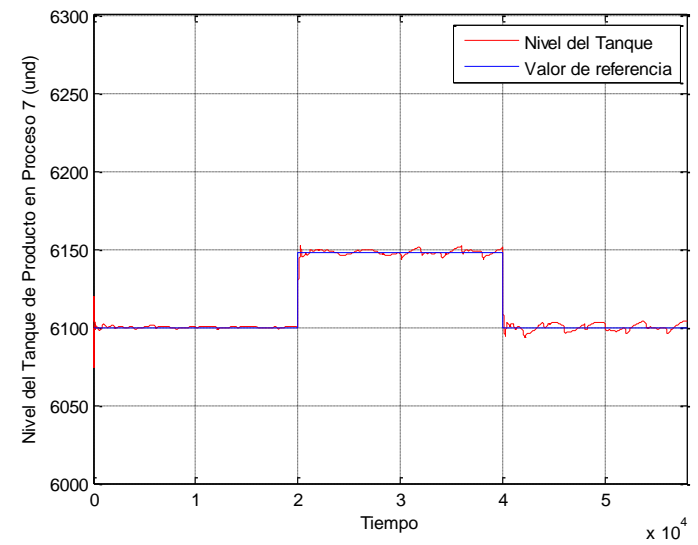


Ilustración 559 Variable PP 7 con DMC en el proceso FFS - D3 - P1.

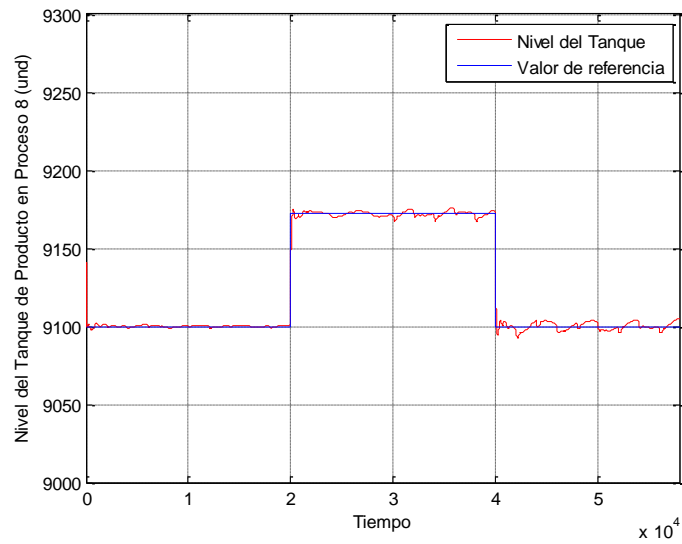


Ilustración 560 Variable PP 8 con DMC en el proceso FFS – D3 – P1.

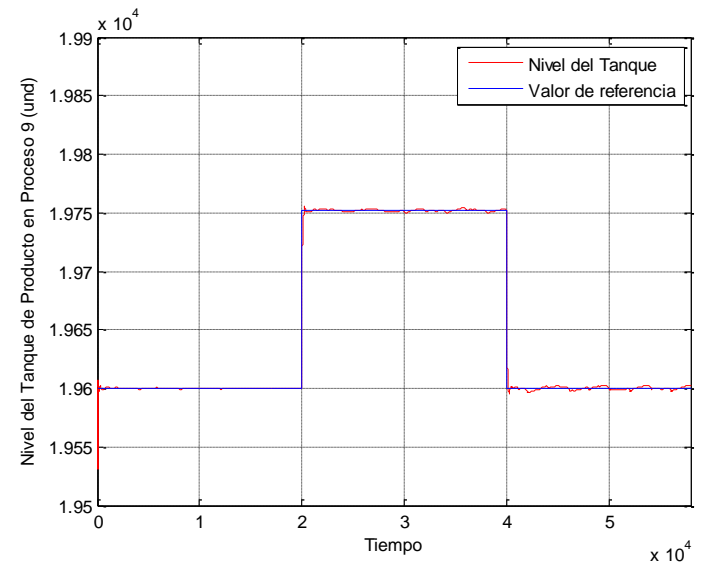


Ilustración 561 Variable PP 9 con DMC en el proceso FFS – D3 – P1.

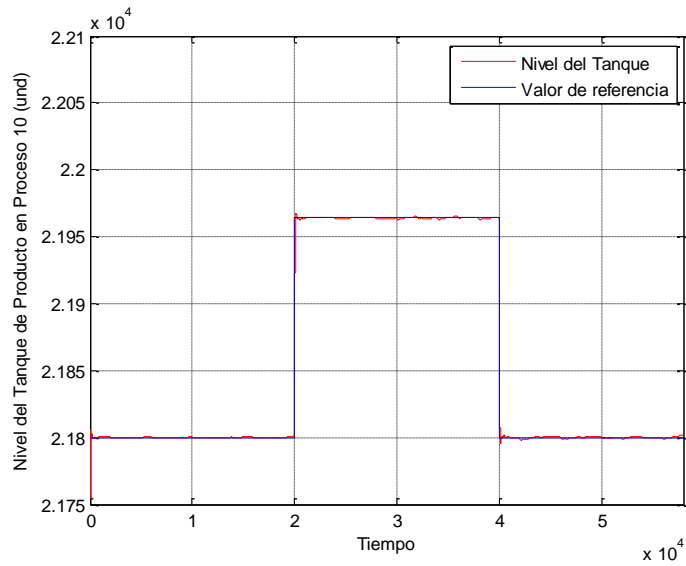


Ilustración 562 Variable PP 10 con DMC en el proceso FFS – D3 – P1.

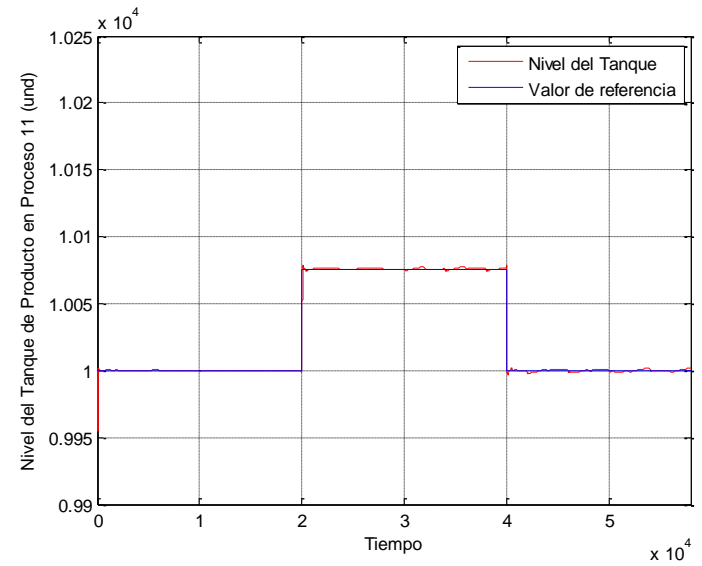


Ilustración 563 Variable PP 11 con DMC en el proceso FFS – D3 – P1.

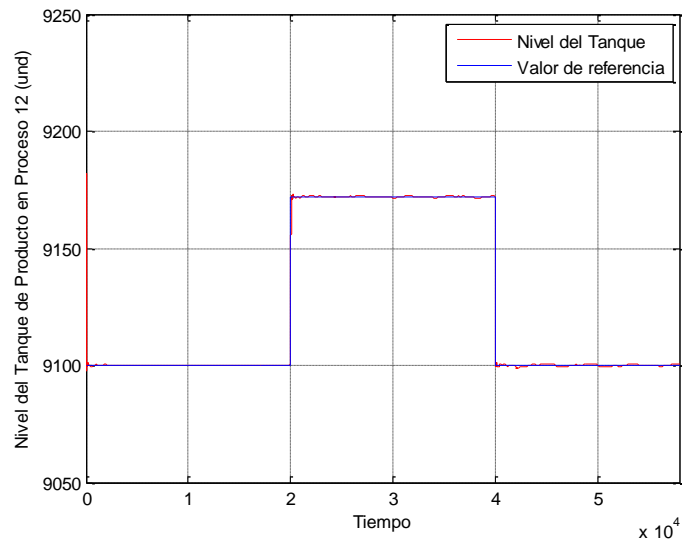


Ilustración 564 Variable PP 12 con DMC en el proceso FFS – D3 – P1.

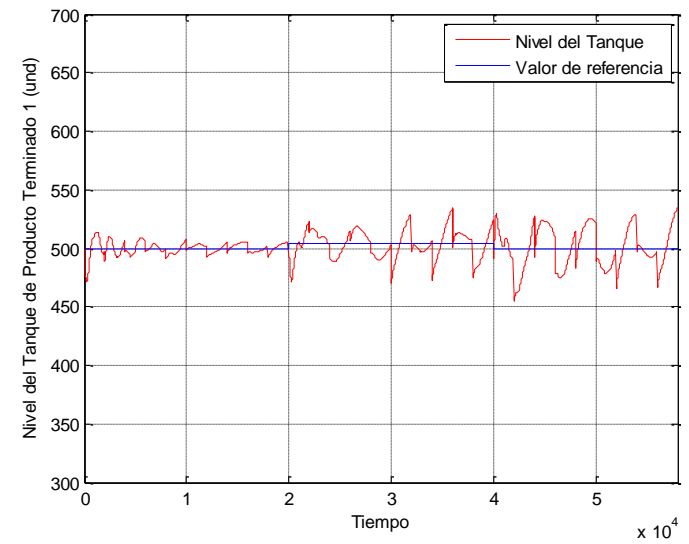


Ilustración 565 Variable PT 1 con DMC en el proceso FFS – D3 – P1.

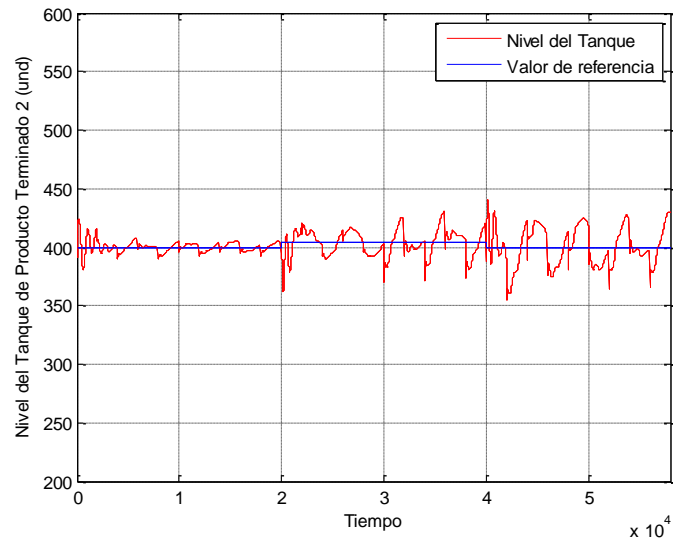


Ilustración 566 Variable PT 2 con DMC en el proceso FFS – D3 – P1.

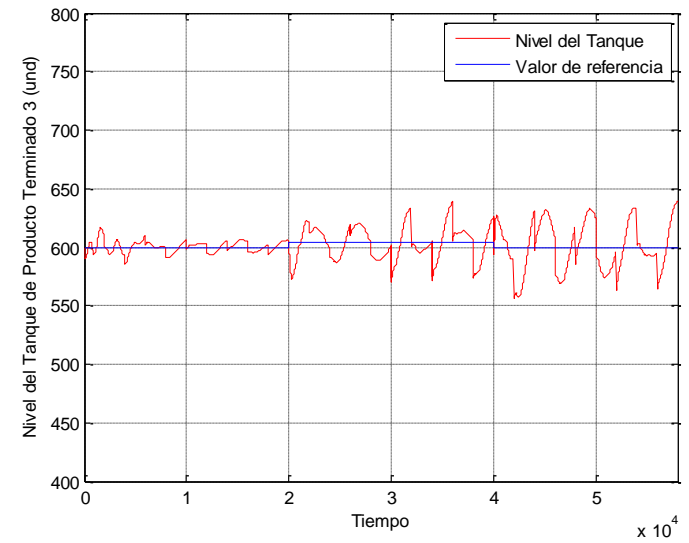


Ilustración 567 Variable PT 3 con DMC en el proceso FFS – D3 – P1.

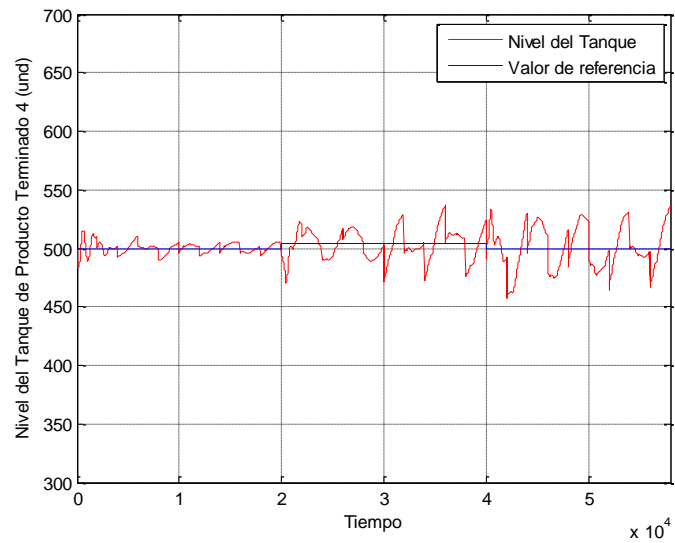


Ilustración 568 Variable PT 4 con DMC en el proceso FFS – D3 – P1.

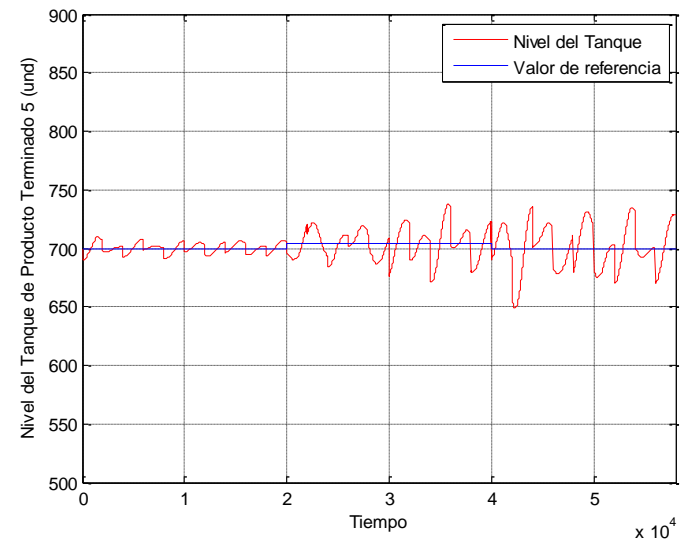


Ilustración 569 Variable PT 5 con DMC en el proceso FFS – D3 – P1.

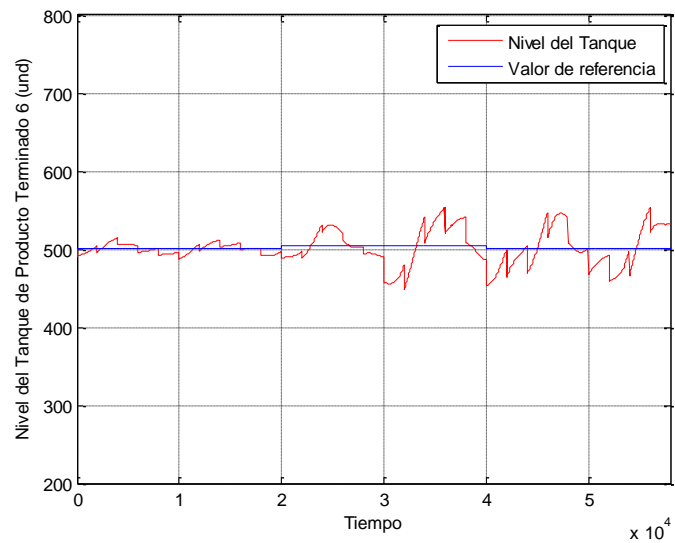


Ilustración 570 Variable PT 6 con DMC en el proceso FFS – D3 – P1.

ANEXO 37. IMPLEMENTACIÓN DMC AL PROCESO FFS CON D3 – P2.

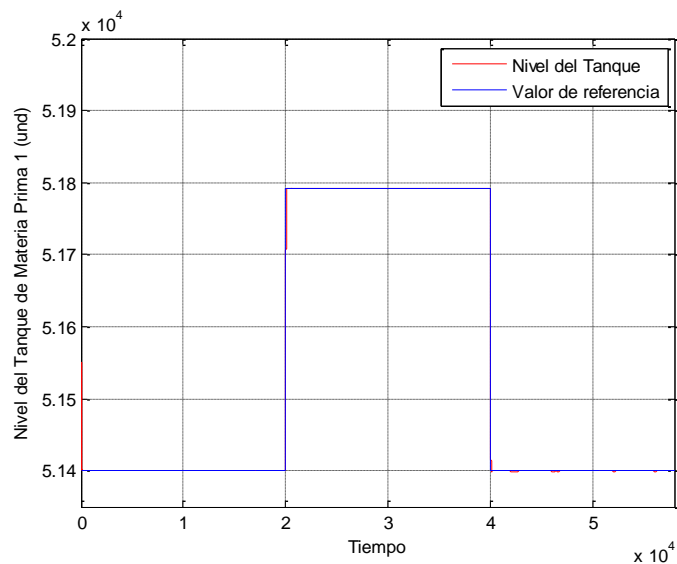


Ilustración 571 Variable MP 1 con DMC en el proceso FFS – D3 – P2.

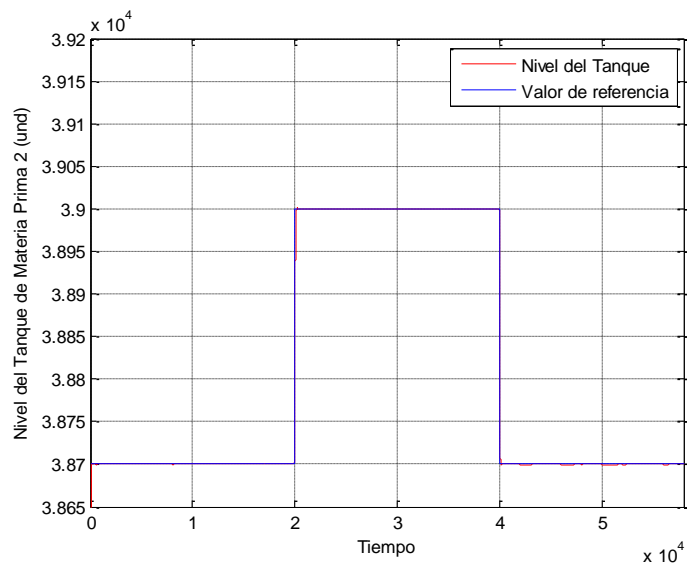


Ilustración 572 Variable MP 2 con DMC en el proceso FFS – D3 – P2.

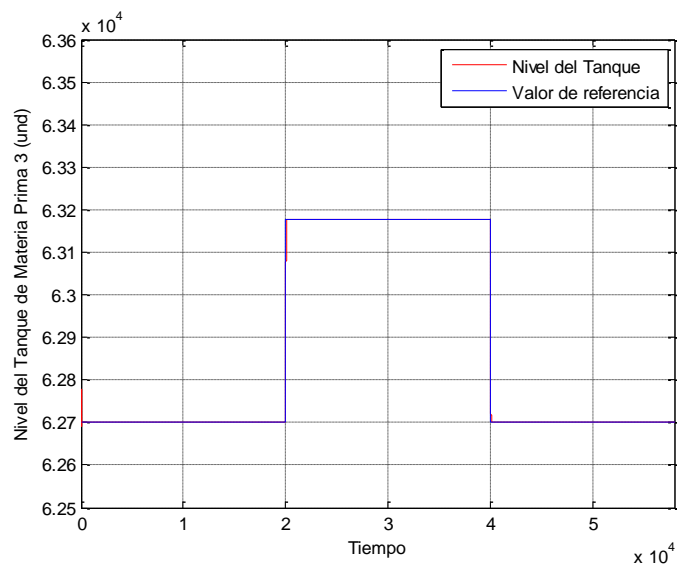


Ilustración 573 Variable MP 3 con DMC en el proceso FFS – D3 – P2.

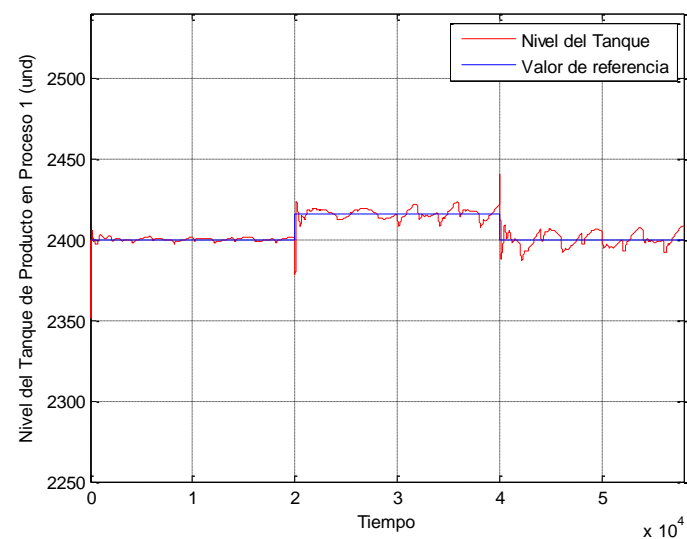


Ilustración 574 Variable PP 1 con DMC en el proceso FFS – D3 – P2.

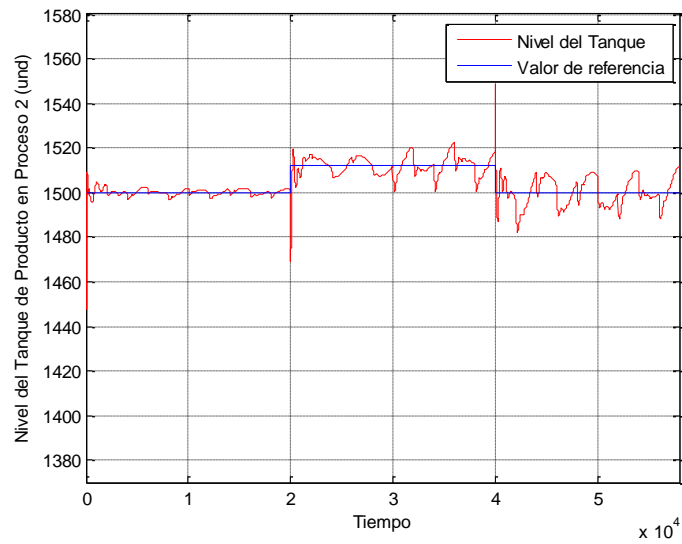


Ilustración 575 Variable PP 2 con DMC en el proceso FFS - D3 - P2.

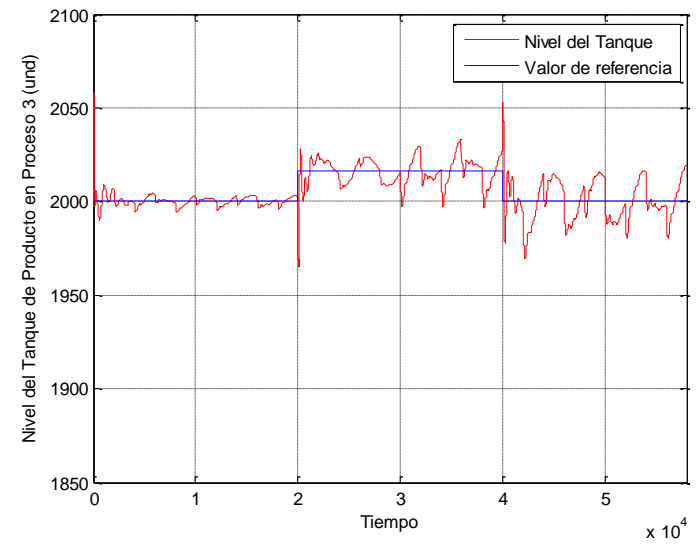


Ilustración 576 Variable PP 3 con DMC en el proceso FFS - D3 - P2.

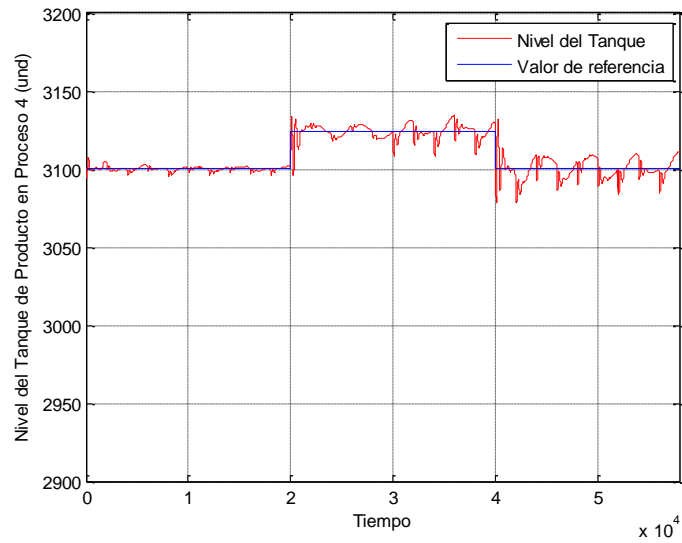


Ilustración 577 Variable PP 4 con DMC en el proceso FFS - D3 - P2.

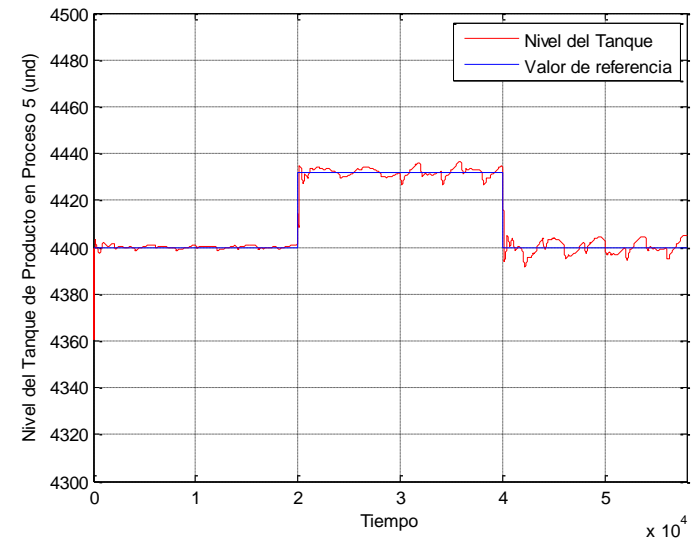


Ilustración 578 Variable PP 5 con DMC en el proceso FFS - D3 - P2.



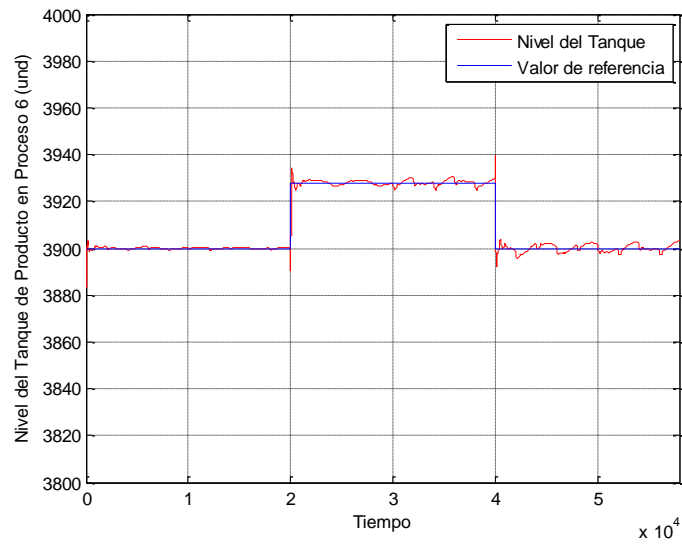


Ilustración 579 Variable PP 6 con DMC en el proceso FFS - D3 - P2.

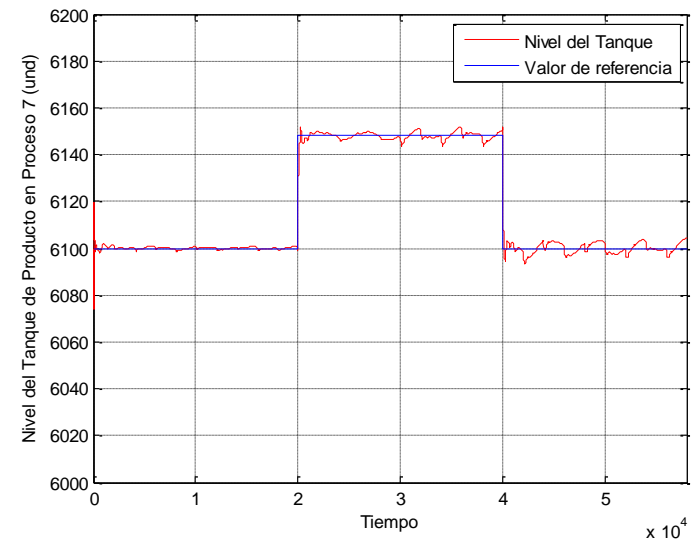


Ilustración 580 Variable PP 7 con DMC en el proceso FFS - D3 - P2.

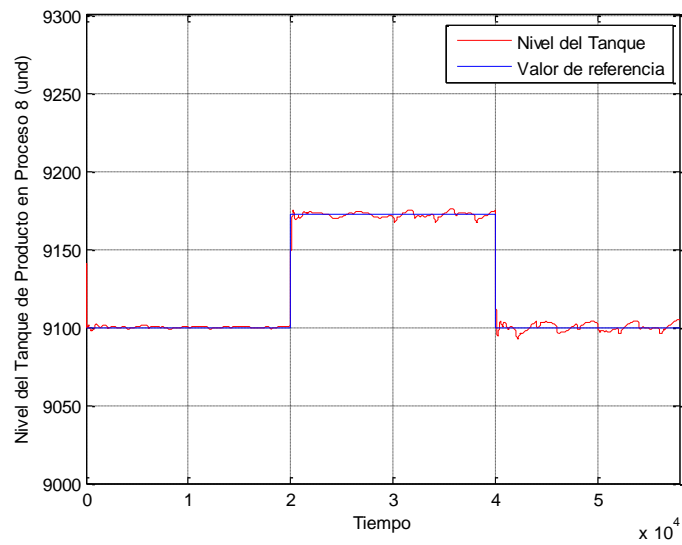


Ilustración 581 Variable PP 8 con DMC en el proceso FFS - D3 - P2.

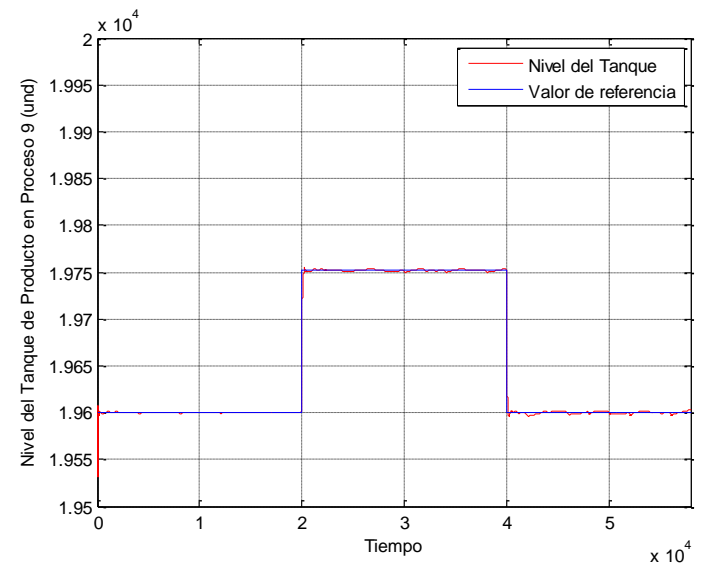


Ilustración 582 Variable PP 9 con DMC en el proceso FFS - D3 - P2.

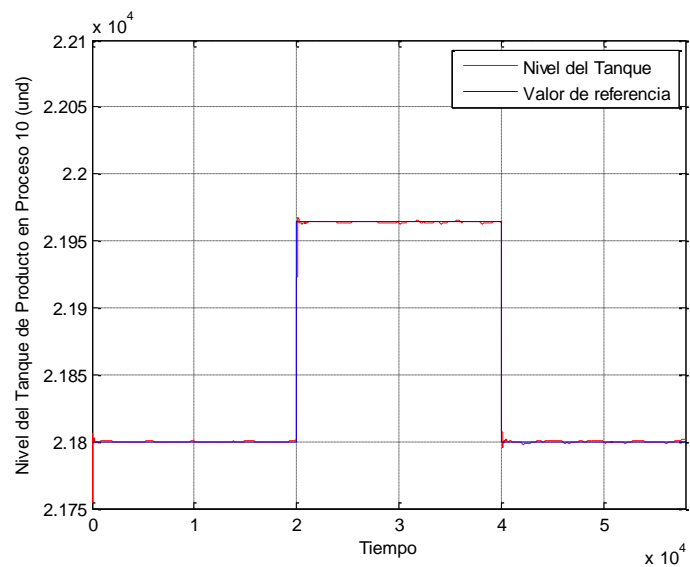


Ilustración 583 Variable PP 10 con DMC en el proceso FFS – D3 – P2.

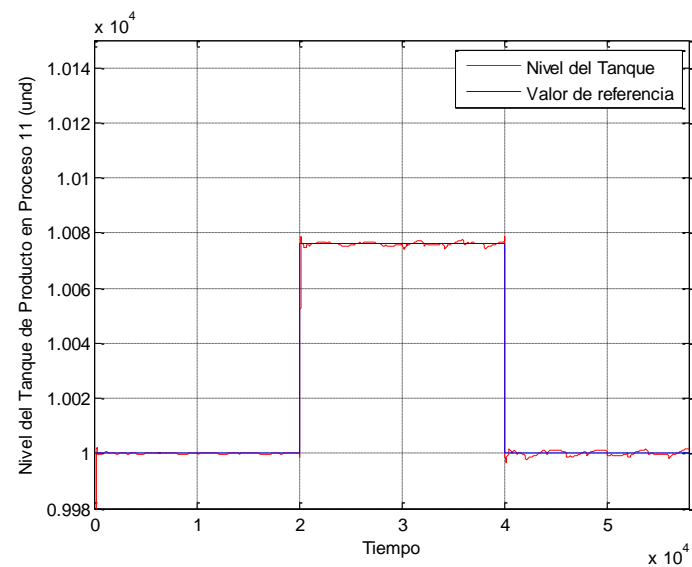


Ilustración 584 Variable PP 11 con DMC en el proceso FFS – D3 – P2.

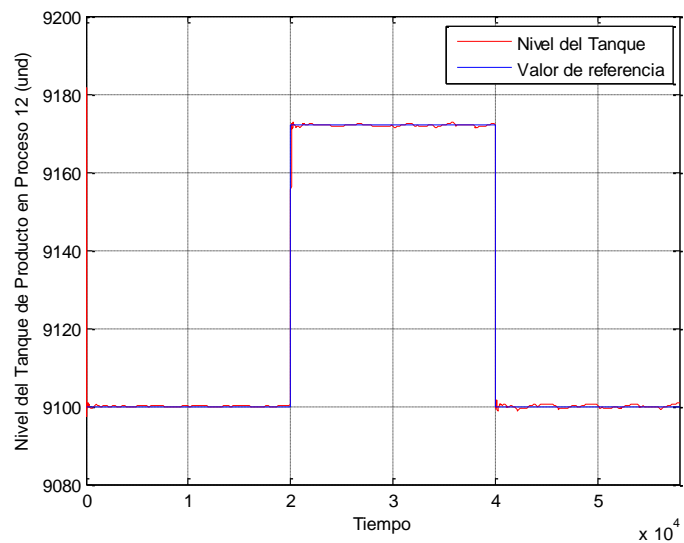


Ilustración 585 Variable PP 12 con DMC en el proceso FFS – D3 – P2.

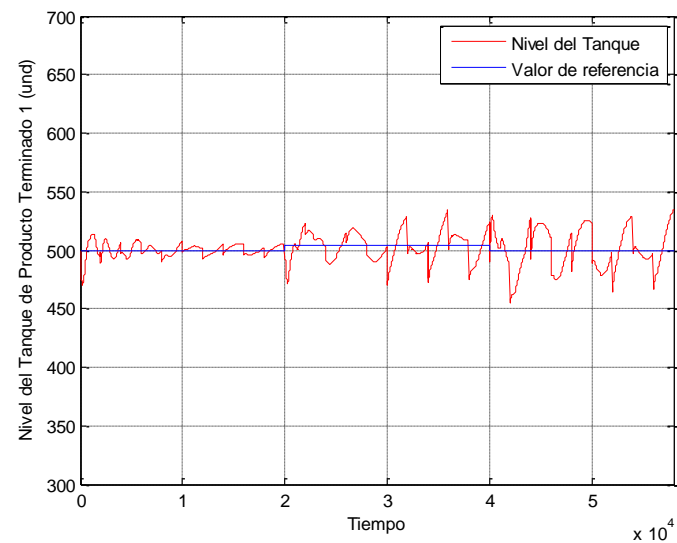


Ilustración 586 Variable PT 1 con DMC en el proceso FFS – D3 – P2.

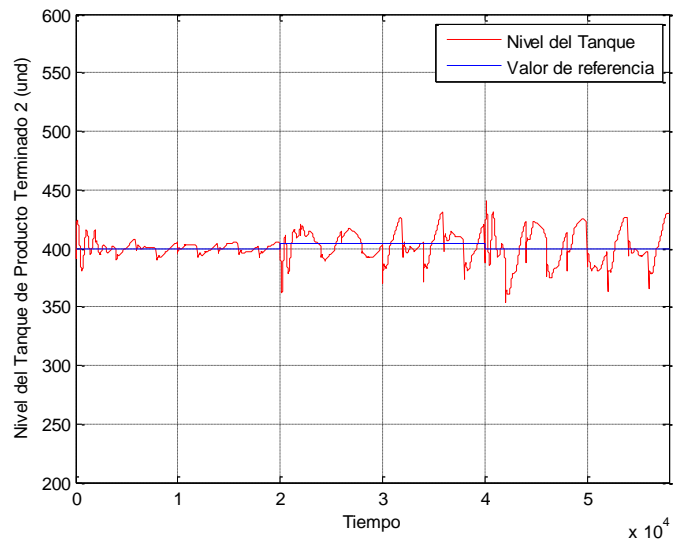


Ilustración 587 Variable PT 2 con DMC en el proceso FFS - D3 - P2.

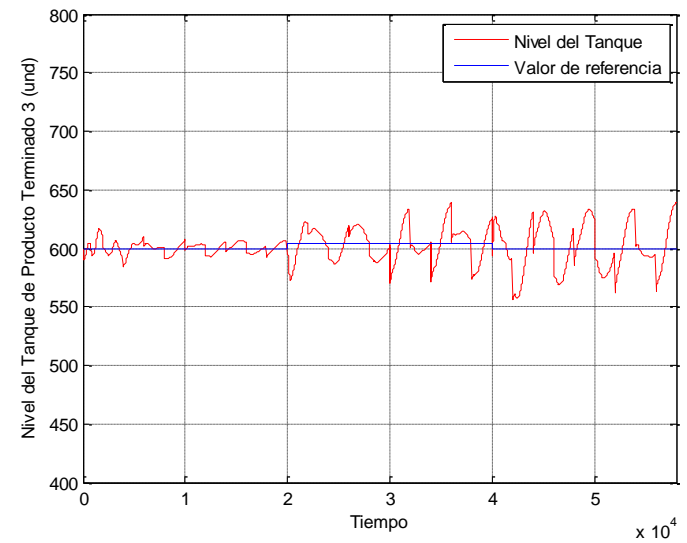


Ilustración 588 Variable PT 3 con DMC en el proceso FFS - D3 - P2.

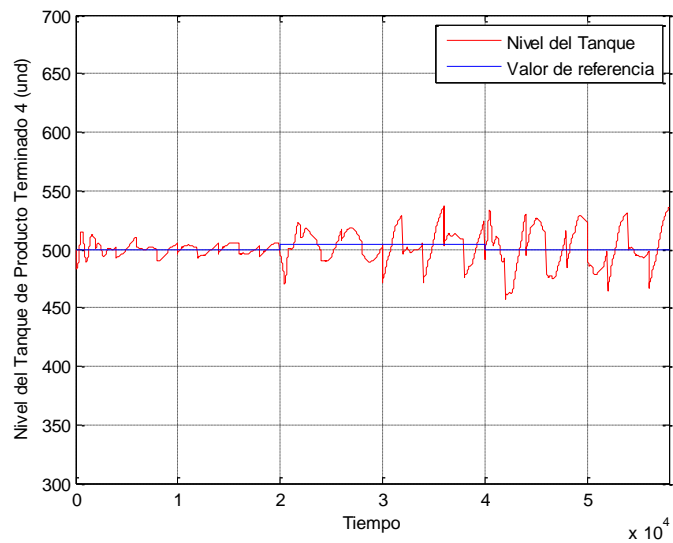


Ilustración 589 Variable PT 4 con DMC en el proceso FFS - D3 - P2.

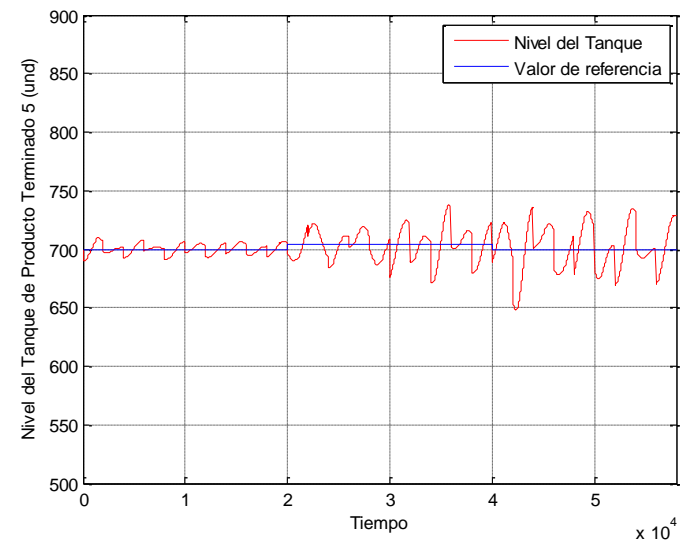


Ilustración 590 Variable PT 5 con DMC en el proceso FFS - D3 - P2.

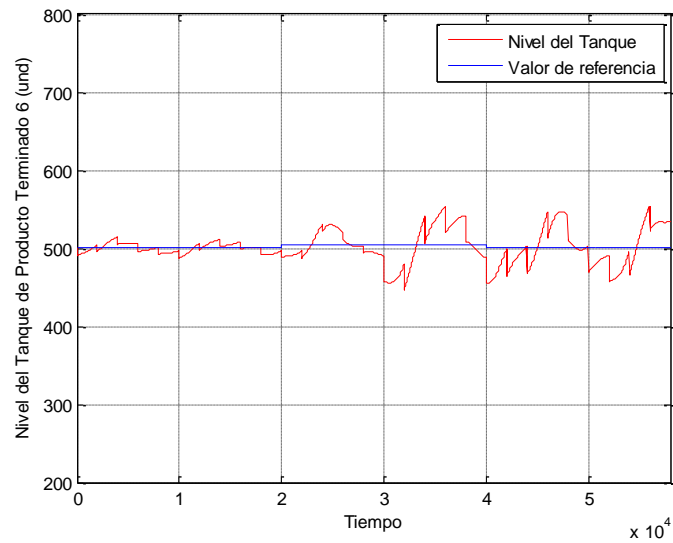


Ilustración 591 Variable PT 6 con DMC en el proceso FFS – D3 – P2.

#### ANEXO 38. IMPLEMENTACIÓN DMC AL PROCESO FFS CON D3 – P3.

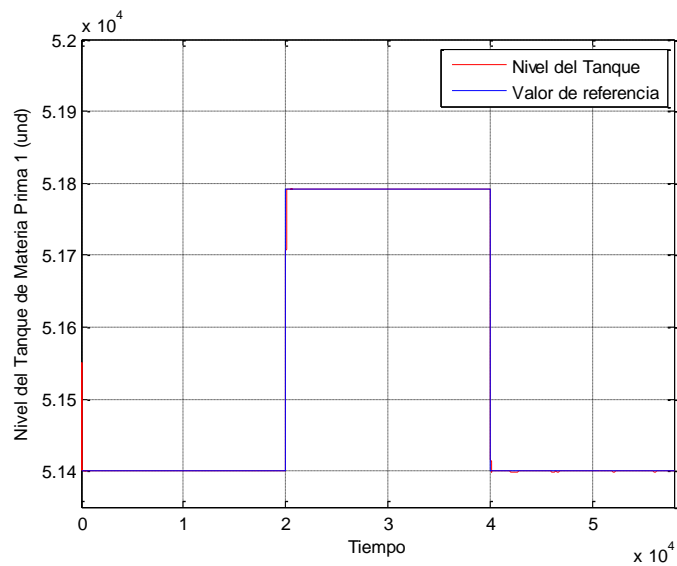


Ilustración 592 Variable MP 1 con DMC en el proceso FFS – D3 – P3.

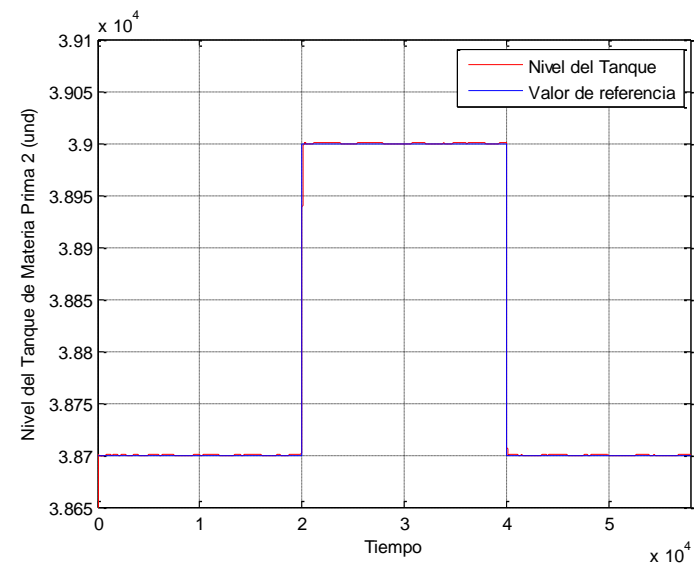


Ilustración 593 Variable MP 2 con DMC en el proceso FFS – D3 – P3.

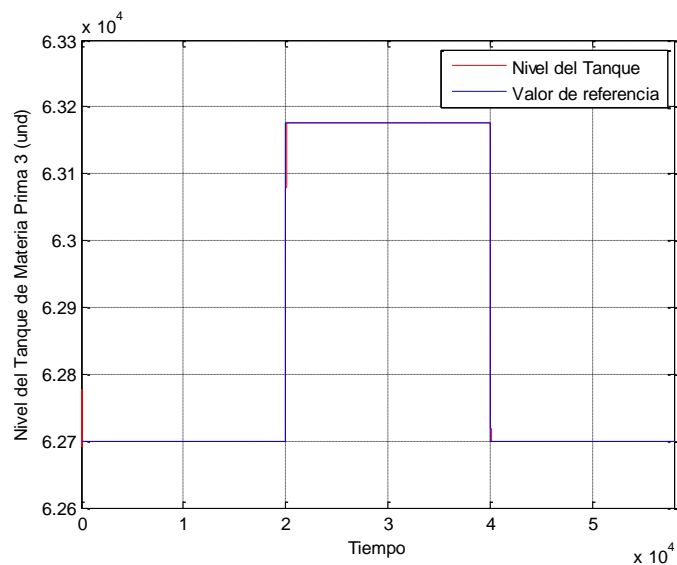


Ilustración 594 Variable MP 3 con DMC en el proceso FFS – D3 – P3.

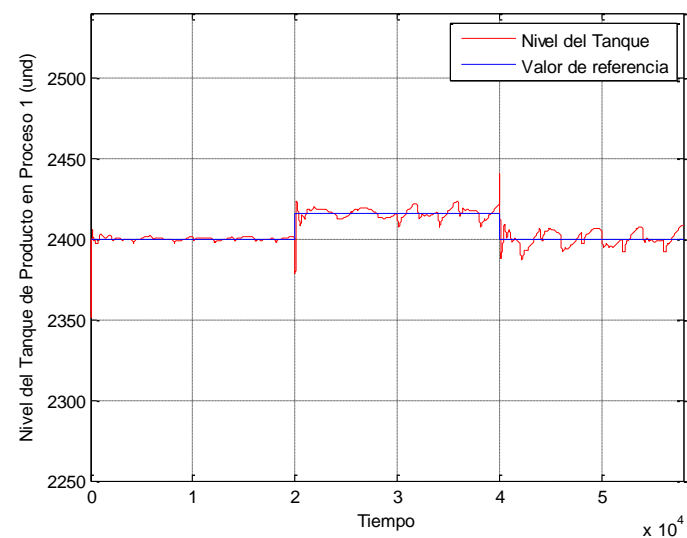


Ilustración 595 Variable PP 1 con DMC en el proceso FFS – D3 – P3.

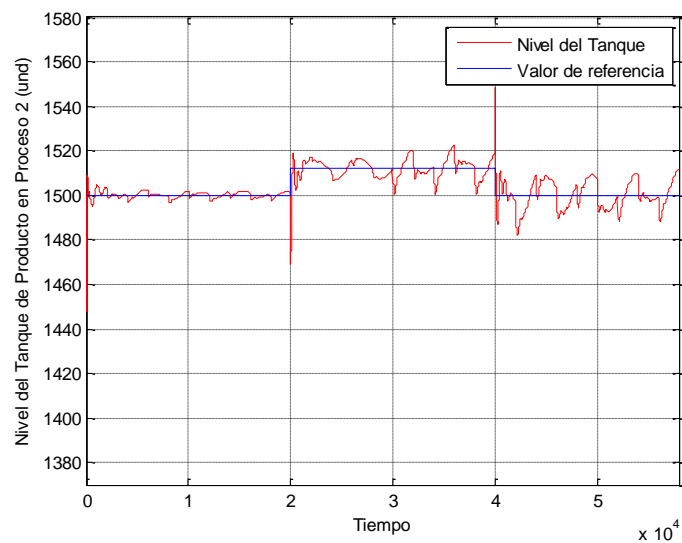


Ilustración 596 Variable PP 2 con DMC en el proceso FFS – D3 – P3.

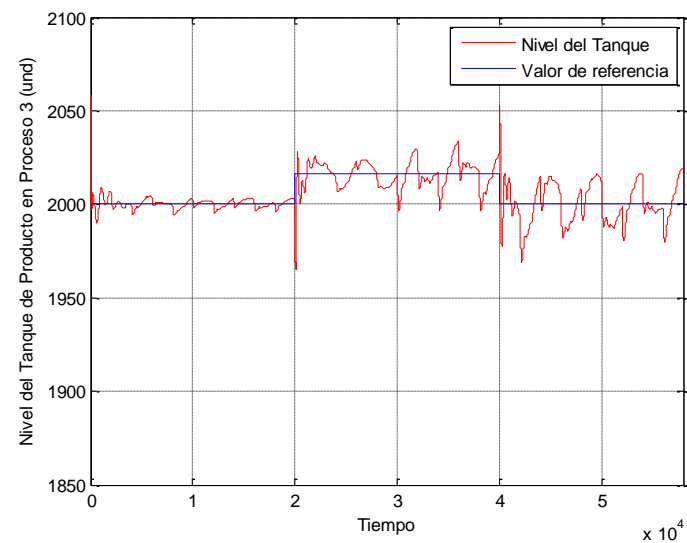


Ilustración 597 Variable PP 3 con DMC en el proceso FFS – D3 – P3.

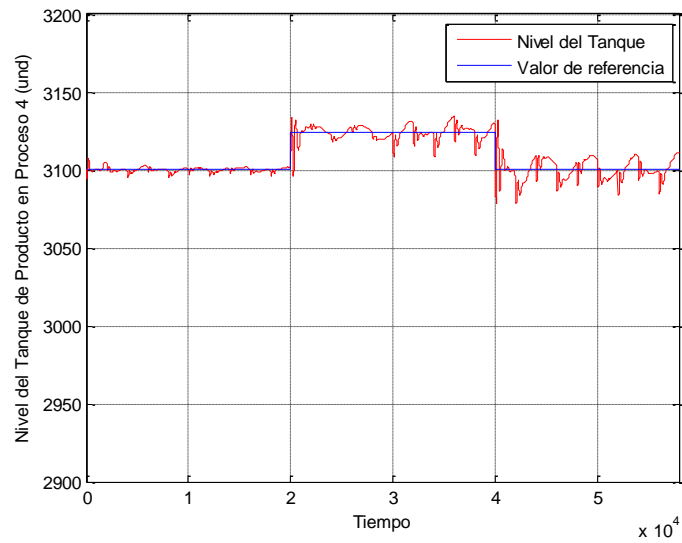


Ilustración 598 Variable PP 4 con DMC en el proceso FFS – D3 – P3.

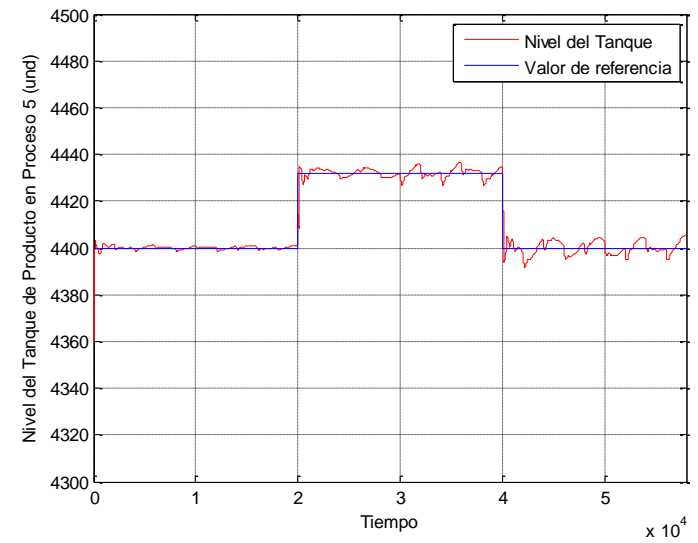


Ilustración 599 Variable PP 5 con DMC en el proceso FFS – D3 – P3.

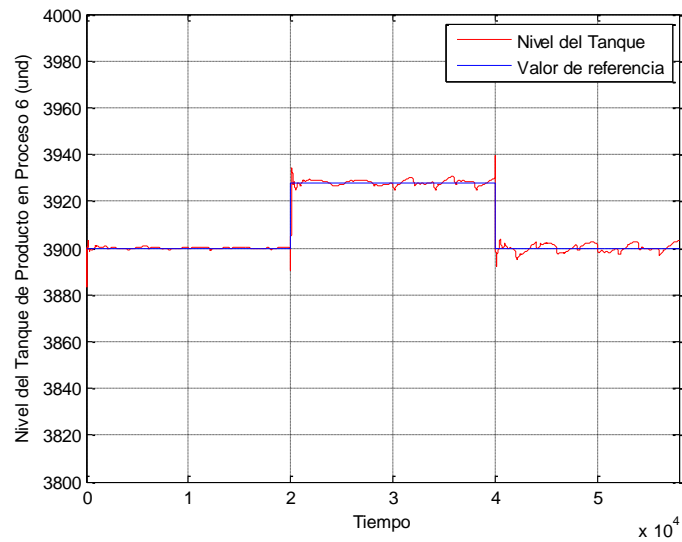


Ilustración 600 Variable PP 6 con DMC en el proceso FFS – D3 – P3.

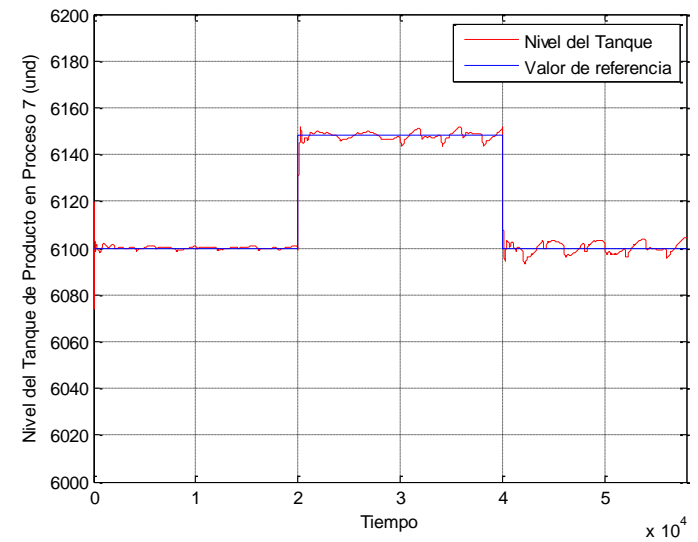


Ilustración 601 Variable PP 7 con DMC en el proceso FFS – D3 – P3.

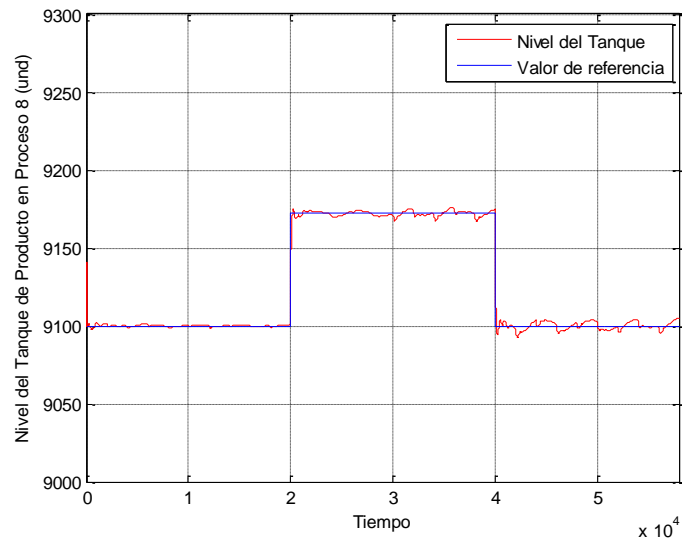


Ilustración 602 Variable PP 8 con DMC en el proceso FFS – D3 – P3.

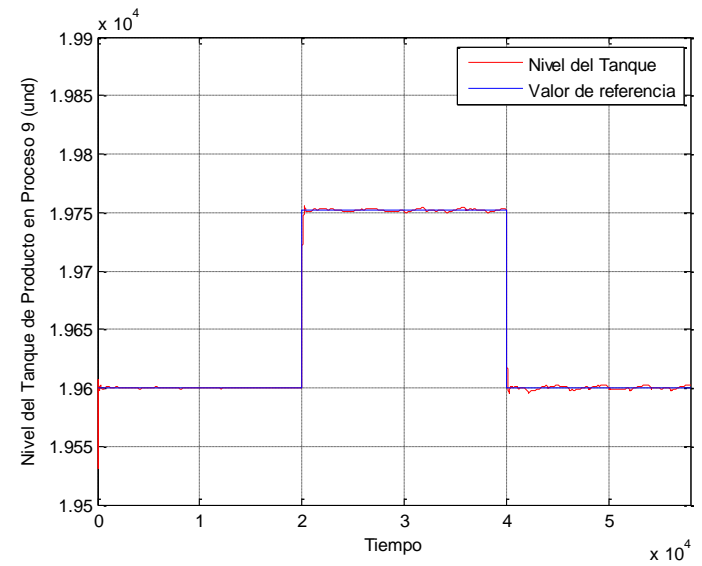


Ilustración 603 Variable PP 9 con DMC en el proceso FFS – D3 – P3.

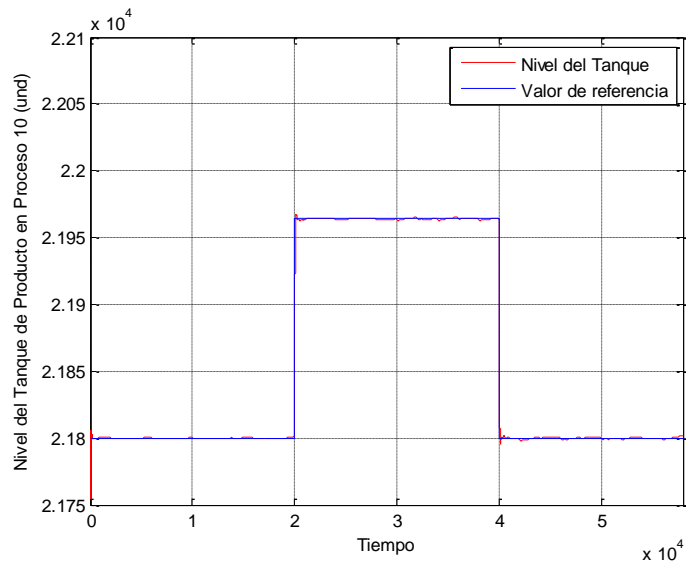


Ilustración 604 Variable PP 10 con DMC en el proceso FFS – D3 – P3.

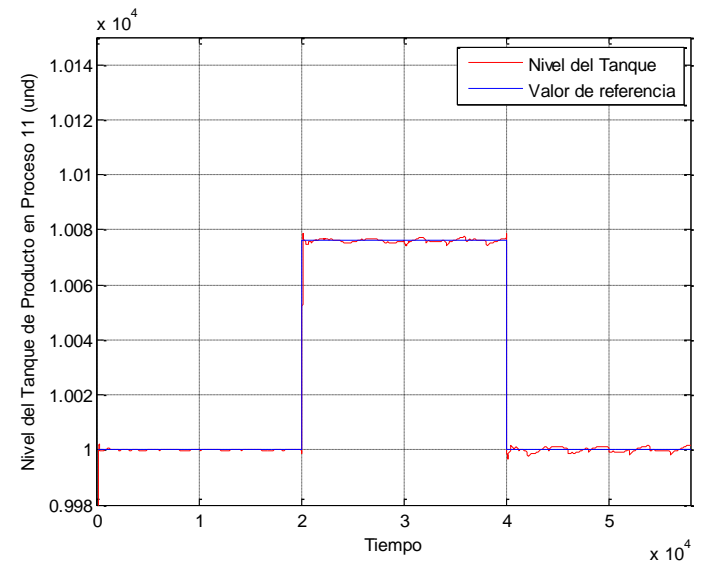


Ilustración 605 Variable PP 11 con DMC en el proceso FFS – D3 – P3.

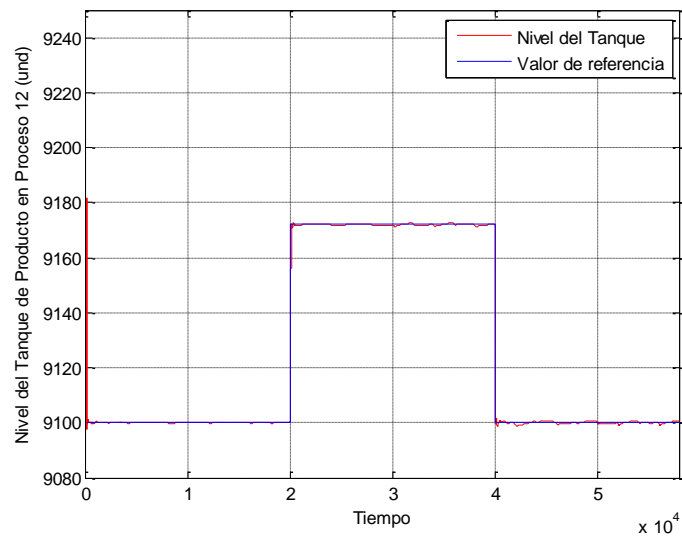


Ilustración 606 Variable PP 12 con DMC en el proceso FFS – D3 – P3.

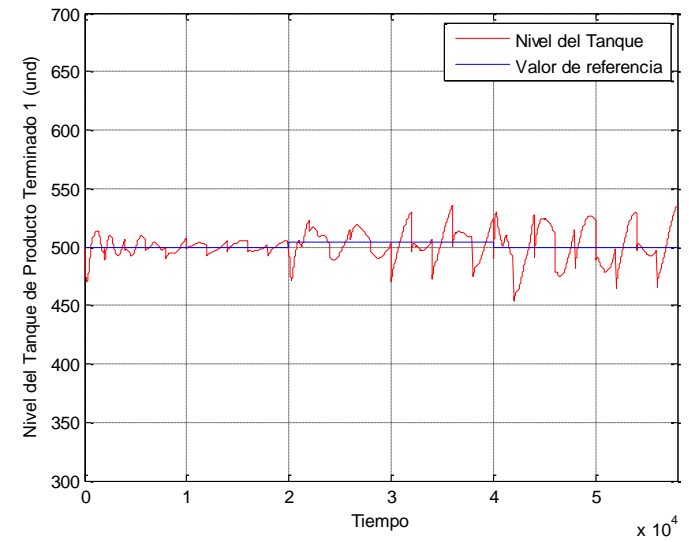


Ilustración 607 Variable PT 1 con DMC en el proceso FFS – D3 – P3.

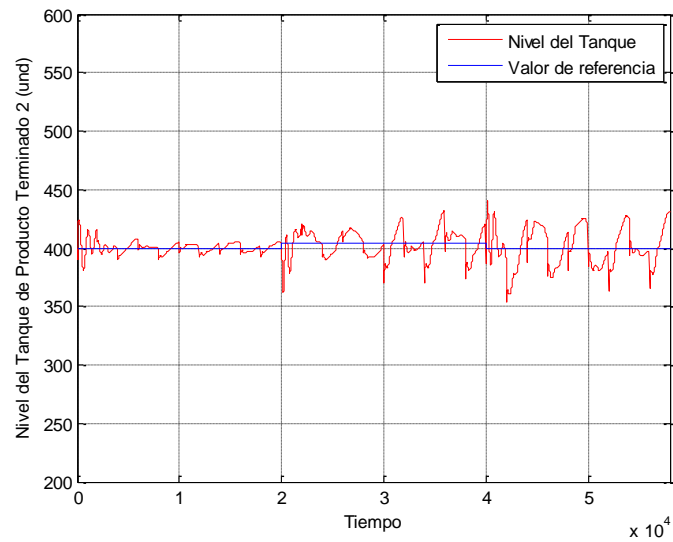


Ilustración 608 Variable PT 2 con DMC en el proceso FFS – D3 – P3.

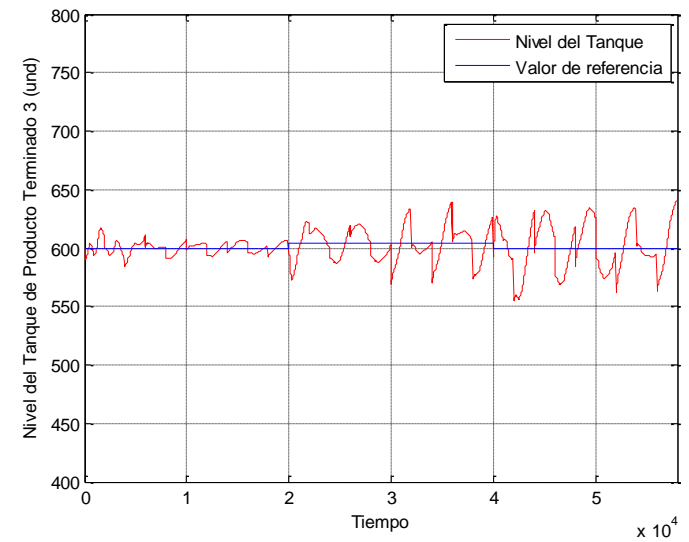
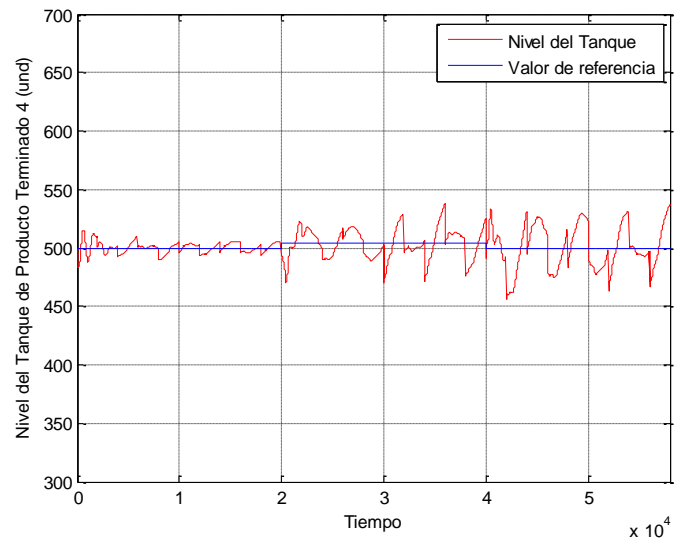
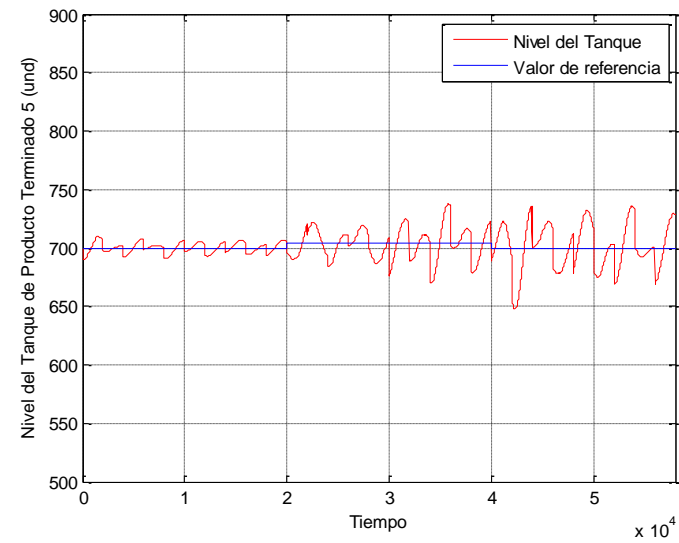


Ilustración 609 Variable PT 3 con DMC en el proceso FFS – D3 – P3.

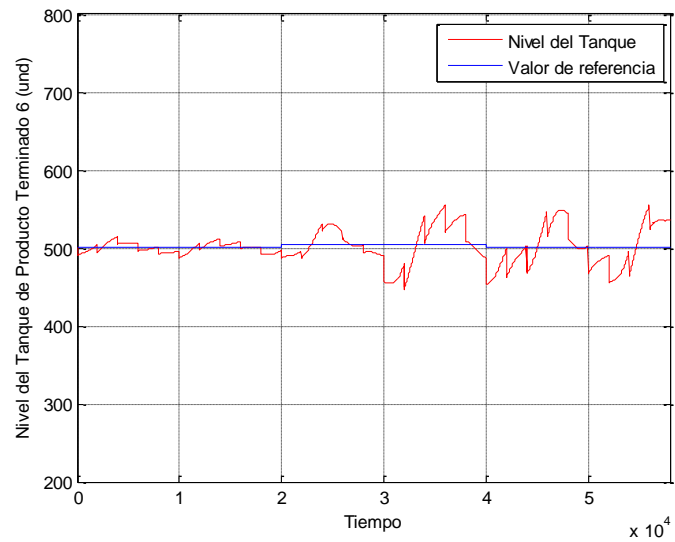




*Ilustración 610 Variable PT 4 con DMC en el proceso FFS – D3 – P3.*



*Ilustración 611 Variable PT 5 con DMC en el proceso FFS – D3 – P3.*



*Ilustración 612 Variable PT 6 con DMC en el proceso FFS – D3 – P3.*

Proceso Job Shop – Demanda Tipo 2 -Lead Time 1												
Factor	PID			DMC			PID			DMC		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
MP1	1033	1042	1052	331	332	332	7231	7294	7364	2317	2324	2324
MP2	1152	1163	1173	657	657	658	8064	8141	8211	4599	4599	4606
MP3	776	783	790	151	151	152	5432	5481	5530	1057	1057	1064
PP1	1138	1150	1163	412	414	416	5690	5750	5815	2060	2070	2080
PP2	739	747	755	157	157	159	3695	3735	3775	785	785	795
PP3	816	826	836	1363	1373	1384	4080	4130	4180	6815	6865	6920
PP4	929	941	952	479	482	488	4645	4705	4760	2395	2410	2440
PT1	632	642	650	752	755	764	6320	6420	6500	7520	7550	7640
PT2	928	940	953	637	637	647	9280	9400	9530	6370	6370	6470
TOTAL	8143	8234	8324	4939	4962	5000	54437	55056	55665	33918	34030	34339

Tabla 11 Costos del sistema de almacenamiento JS – D2 – L1.

Proceso Job Shop – Demanda Tipo 3 – Lead Time 1												
Factor	PID			DMC			PID			DMC		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
MP1	970	982	989	328	329	329	6790	6874	6923	2296	2303	2303
MP2	1089	1099	1109	649	651	652	7623	7693	7763	4543	4557	4564
MP3	728	735	743	149	149	153	5096	5145	5201	1043	1043	1071
PP1	1063	1075	1086	393	396	398	5315	5375	5430	1965	1980	1990
PP2	689	697	704	157	154	154	3445	3485	3520	785	770	770
PP3	757	766	775	1289	1300	1309	3785	3830	3875	6445	6500	6545
PP4	858	869	883	457	461	465	4290	4345	4415	2285	2305	2325
PT1	585	593	600	715	725	724	5850	5930	6000	7150	7250	7240
PT2	855	869	879	611	616	616	8550	8690	8790	6110	6160	6160
TOTAL	7594	7685	7768	4748	4781	4800	50744	51367	51917	32622	32868	32968

Tabla 12 Costos del sistema de almacenamiento JS – D3 – L1.

Proceso Job Shop – Demanda Tipo 1 -Lead Time 2												
Factor	PID			DMC			PID			DMC		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
MP1	957	963	969	312	313	313	6699	6741	6783	2184	2191	2191
MP2	1227	1233	1239	612	611	611	8589	8631	8673	4284	4277	4277
MP3	718	723	727	150	152	153	5026	5061	5089	1050	1064	1071
PP1	1057	1065	1074	382	384	386	5285	5325	5370	1910	1920	1930
PP2	685	690	695	153	154	154	3425	3450	3475	765	770	770
PP3	762	766	772	1272	1279	1286	3810	3830	3860	6360	6395	6430
PP4	864	871	876	460	463	466	4320	4355	4380	2300	2315	2330
PT1	590	598	600	714	719	720	5900	5980	6000	7140	7190	7200
PT2	864	872	882	609	616	617	8640	8720	8820	6090	6160	6170
TOTAL	7724	7781	7834	4664	4691	4706	51694	52093	52450	32083	32282	32369

Tabla 13 Costos del sistema de almacenamiento JS – D1 – L2.

Proceso Job Shop – Demanda Tipo 2 -Lead Time 2												
Factor	PID			DMC			PID			DMC		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
MP1	1032	1042	1052	340	340	341	7224	7294	7364	2380	2380	2387
MP2	1326	1336	1346	661	662	663	9282	9352	9422	4627	4634	4641
MP3	775	783	790	162	163	163	5425	5481	5530	1134	1141	1141
PP1	1138	1150	1163	412	415	417	5690	5750	5815	2060	2075	2085
PP2	738	747	755	165	166	166	3690	3735	3775	825	830	830
PP3	816	826	837	1369	1378	1388	4080	4130	4185	6845	6890	6940
PP4	928	940	952	492	496	503	4640	4700	4760	2460	2480	2515
PT1	634	641	650	758	762	769	6340	6410	6500	7580	7620	7690
PT2	929	942	953	641	641	652	9290	9420	9530	6410	6410	6520
TOTAL	8316	8407	8498	5000	5023	5062	55661	56272	56881	34321	34460	34749

Tabla 14 Costos del sistema de almacenamiento JS – D2 – L2.

Proceso Job Shop – Demanda Tipo 3 -Lead Time 2												
Factor	PID			DMC			PID			DMC		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
MP1	970	980	989	337	338	338	6790	6860	6923	2359	2366	2366
MP2	1263	1273	1283	655	656	657	8841	8911	8981	4585	4592	4599
MP3	728	735	743	160	160	161	5096	5145	5201	1120	1120	1127
PP1	1063	1075	1086	395	399	399	5315	5375	5430	1975	1995	1995
PP2	689	698	706	161	162	162	3445	3490	3530	805	810	810
PP3	756	769	775	1292	1303	1312	3780	3845	3875	6460	6515	6560
PP4	858	869	881	468	473	476	4290	4345	4405	2340	2365	2380
PT1	586	591	600	722	726	729	5860	5910	6000	7220	7260	7290
PT2	855	869	879	615	620	620	8550	8690	8790	6150	6200	6200
TOTAL	7768	7859	7942	4805	4837	4857	51967	52571	53135	33014	33223	33327

Tabla 15 Costos del sistema de almacenamiento JS – D3 – L2.

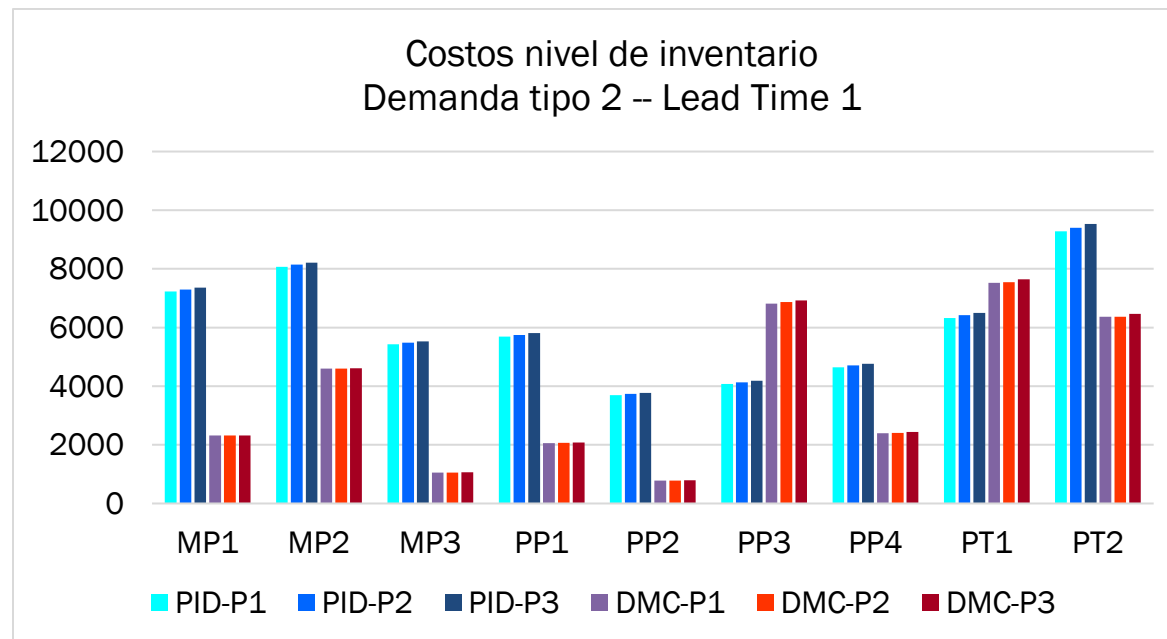
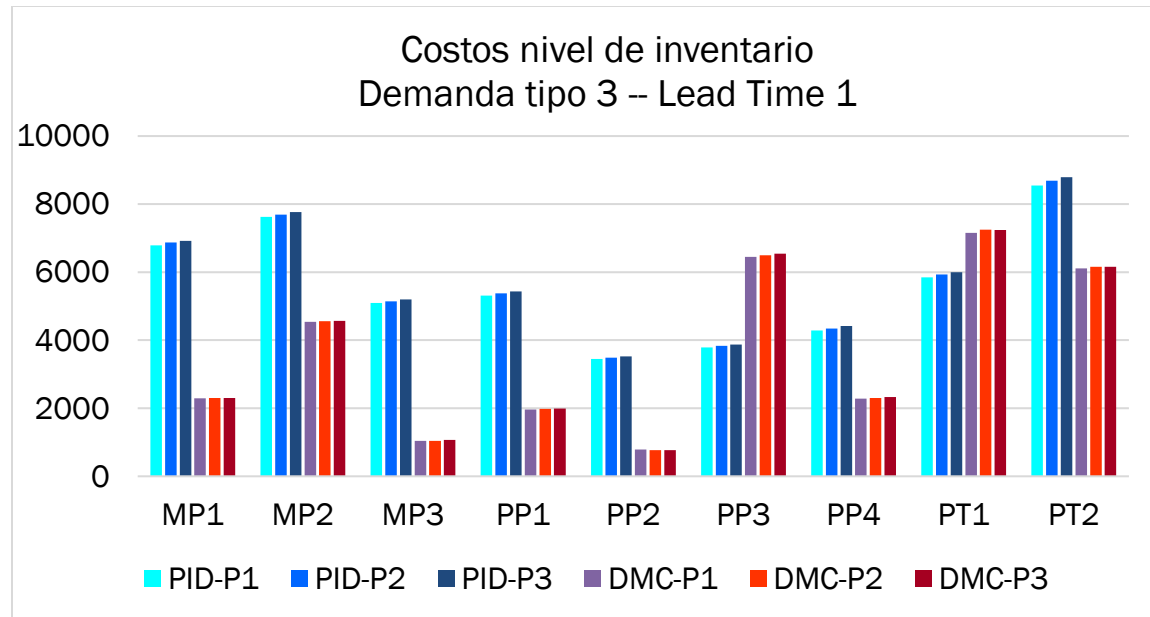
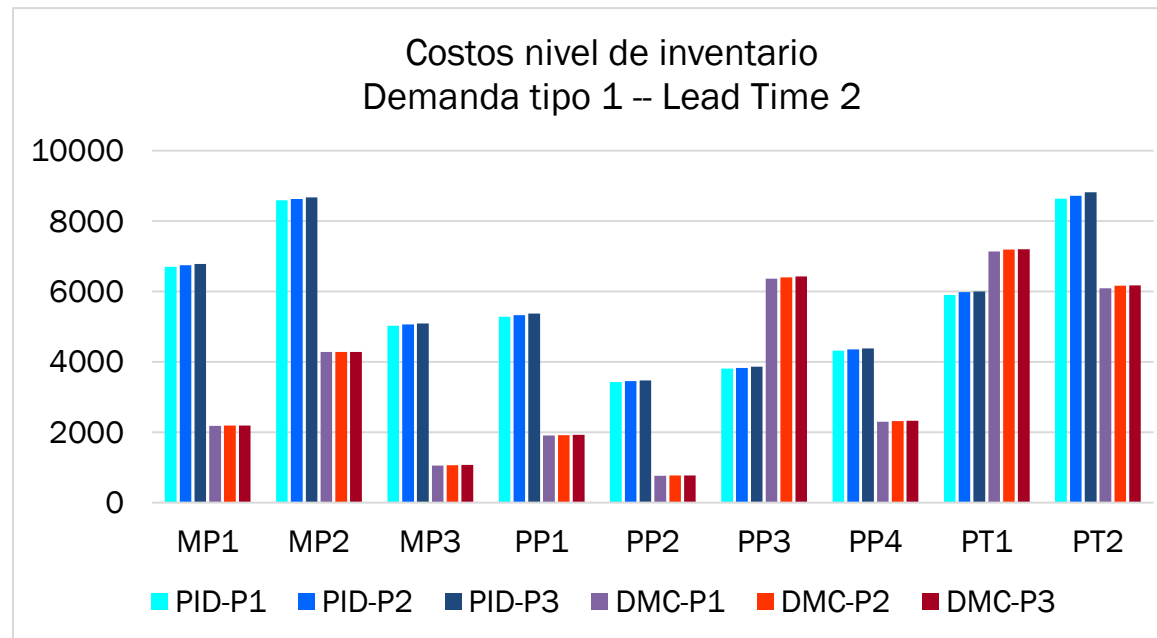


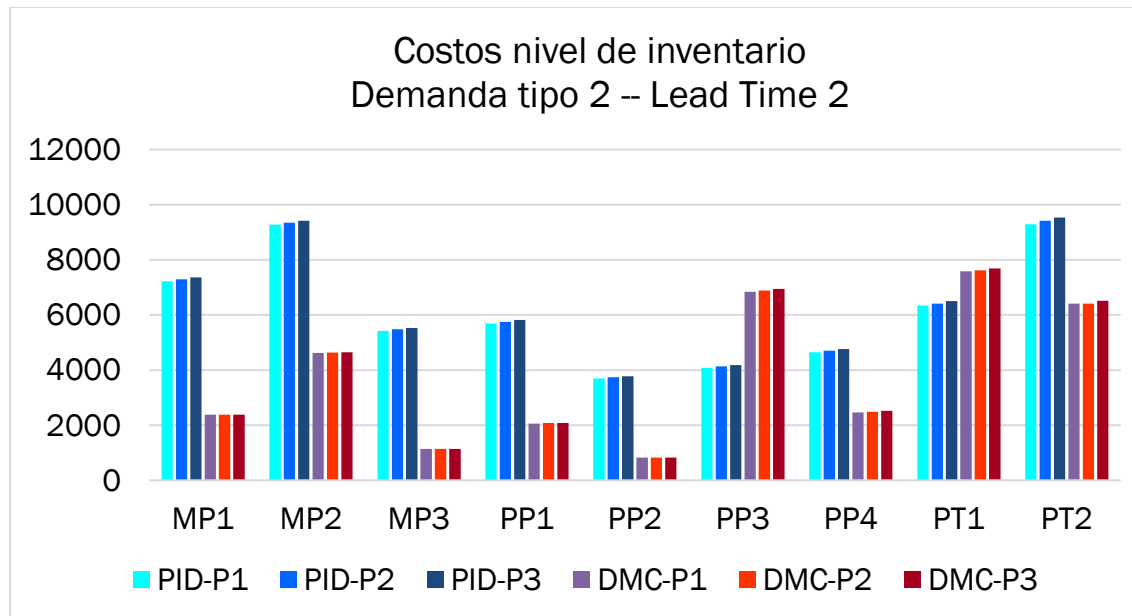
Ilustración 613 Costos del sistema de almacenamiento JS – D2 – L1.



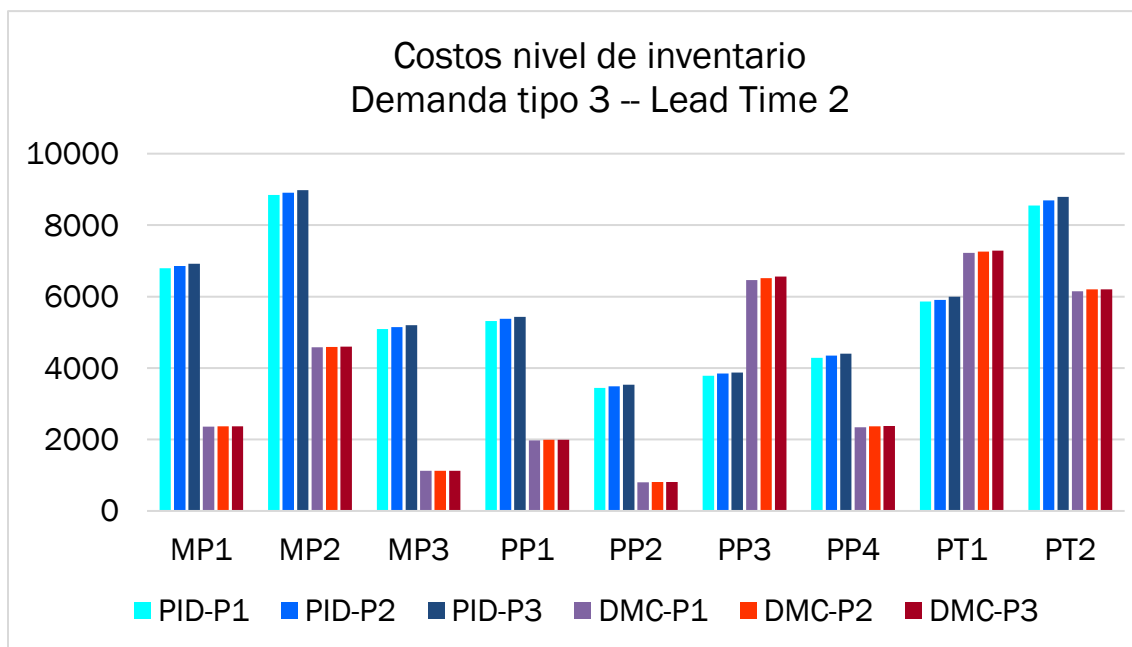
*Ilustración 614 Costos del sistema de almacenamiento JS – D3 – L1.*



*Ilustración 615 Costos del sistema de almacenamiento JS – D1 – L2.*



*Ilustración 616 Costos del sistema de almacenamiento JS – D2 – L2.*



*Ilustración 617 Costos del sistema de almacenamiento JS – D3 – L2.*

Proceso Flexible Flow Shop – Demanda Tipo 2 – Lead Time 1												
Factor	PID			DMC			PID			DMC		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
MP1	589	598	606	34	35	35	4123	4186	4242	238	245	245
MP2	592	602	612	24	24	24	4144	4214	4284	168	168	168
MP3	589	597	607	24	24	24	4123	4179	4249	168	168	168
PP1	539	549	557	150	151	153	2695	2745	2785	750	755	765
PP2	587	594	605	205	207	209	2935	2970	3025	1025	1035	1045
PP3	594	607	618	346	350	354	2970	3035	3090	1730	1750	1770
PP4	582	591	602	208	210	213	2910	2955	3010	1040	1050	1065
PP5	574	580	592	96	97	99	2870	2900	2960	480	485	495
PP6	560	569	579	55	59	62	2800	2845	2895	275	295	310
PP7	590	600	610	78	79	80	2950	3000	3050	390	395	400
PP8	596	606	616	88	90	90	2980	3030	3080	440	450	450
PP9	589	599	609	56	57	57	2945	2995	3045	280	285	285
PP10	584	593	603	32	32	34	2920	2965	3015	160	160	170
PP11	583	593	603	33	33	34	2915	2965	3015	165	165	170
PP12	600	610	620	22	22	22	3000	3050	3100	110	110	110
PT1	587	597	608	579	584	593	5870	5970	6080	5790	5840	5930
PT2	649	660	670	544	549	556	6490	6600	6700	5440	5490	5560
PT3	537	544	554	677	685	693	5370	5440	5540	6770	6850	6930
PT4	577	588	597	608	618	622	5770	5880	5970	6080	6180	6220
PT5	497	505	514	740	753	762	4970	5050	5140	7400	7530	7620
PT6	593	603	613	1291	1321	1339	5930	6030	6130	12910	13210	13390
TOTAL	12188	12387	12595	5899	5980	6055	81680	83004	84405	51809	52616	53266

Tabla 16 Costos del sistema de almacenamiento FFS – D2.

Proceso Flexible Flow Shop – Demanda Tipo 3 – Lead Time 1												
Factor	PID			DMC			PID			DMC		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
MP1	545	554	564	57	57	57	3815	3878	3948	399	399	399
MP2	546	556	566	40	42	43	3822	3892	3962	280	294	301
MP3	542	552	562	44	44	45	3794	3864	3934	308	308	315
PP1	488	497	506	211	212	213	2440	2485	2530	1055	1060	1065
PP2	530	539	549	286	287	289	2650	2695	2745	1430	1435	1445
PP3	538	548	558	486	488	491	2690	2740	2790	2430	2440	2455
PP4	528	538	548	286	288	292	2640	2690	2740	1430	1440	1460
PP5	520	529	539	136	136	137	2600	2645	2695	680	680	685
PP6	512	522	527	79	80	83	2560	2610	2635	395	400	415
PP7	539	547	557	110	110	111	2695	2735	2785	550	550	555
PP8	544	554	564	125	126	126	2720	2770	2820	625	630	630
PP9	543	556	566	81	81	82	2715	2780	2830	405	405	410
PP10	538	544	554	48	48	49	2690	2720	2770	240	240	245
PP11	535	544	554	48	48	49	2675	2720	2770	240	240	245
PP12	551	560	570	31	31	31	2755	2800	2850	155	155	155
PT1	535	547	555	812	815	821	5350	5470	5550	8120	8150	8210
PT2	589	601	612	757	762	765	5890	6010	6120	7570	7620	7650
PT3	487	496	505	954	955	963	4870	4960	5050	9540	9550	9630
PT4	524	535	544	842	843	851	5240	5350	5440	8420	8430	8510
PT5	452	460	468	856	861	871	4520	4600	4680	8560	8610	8710
PT6	540	550	560	1301	1300	1343	5400	5500	5600	13010	13000	13430
TOTAL	11126	11325	11528	7590	7614	7712	74531	75914	77244	65842	66036	66920

Tabla 17 Costos del sistema de almacenamiento FFS – D3.



Proceso Flexible Flow Shop – Demanda Tipo 1 – Lead Time 2												
Factor	PID			DMC			PID			DMC		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
MP1	526	532	539	18	18	19	3682	3724	3773	126	126	133
MP2	534	542	546	11	11	11	3738	3794	3822	77	77	77
MP3	528	537	542	4	4	4	3696	3759	3794	28	28	28
PP1	495	499	508	133	134	135	2475	2495	2540	665	670	675
PP2	535	542	550	180	181	184	2675	2710	2750	900	905	920
PP3	544	551	562	305	306	310	2720	2755	2810	1525	1530	1550
PP4	534	540	547	187	189	192	2670	2700	2735	935	945	960
PP5	524	529	534	84	85	86	2620	2645	2670	420	425	430
PP6	509	517	525	47	48	48	2545	2585	2625	235	240	240
PP7	537	544	551	67	69	70	2685	2720	2755	335	345	350
PP8	546	550	558	75	76	76	2730	2750	2790	375	380	380
PP9	533	540	547	44	44	45	2665	2700	2735	220	220	225
PP10	528	535	542	22	22	22	2640	2675	2710	110	110	110
PP11	528	535	542	26	26	27	2640	2675	2710	130	130	135
PP12	543	550	557	17	18	18	2715	2750	2785	85	90	90
PT1	541	548	557	506	509	515	5410	5480	5570	5060	5090	5150
PT2	598	606	614	483	483	489	5980	6060	6140	4830	4830	4890
PT3	493	499	506	592	592	599	4930	4990	5060	5920	5920	5990
PT4	531	539	545	533	534	541	5310	5390	5450	5330	5340	5410
PT5	457	463	470	670	679	688	4570	4630	4700	6700	6790	6880
PT6	547	554	560	1052	1074	1072	5470	5540	5600	10520	10740	10720
TOTAL	11111	11252	11402	5056	5102	5151	74566	75527	76524	44526	44931	45343

Tabla 18 Costos del sistema de almacenamiento FFS – D1 – L2.

Proceso Flexible Flow Shop – Demanda Tipo 2 – Lead Time 2												
Factor	PID			DMC			PID			DMC		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
MP1	599	606	616	35	35	35	4193	4242	4312	245	245	245
MP2	594	604	617	24	26	29	4158	4228	4319	168	182	203
MP3	590	599	609	24	24	24	4130	4193	4263	168	168	168
PP1	539	549	557	152	152	154	2695	2745	2785	760	760	770
PP2	587	599	608	207	207	214	2935	2995	3040	1035	1035	1070
PP3	594	604	614	347	350	355	2970	3020	3070	1735	1750	1775
PP4	582	592	602	208	210	213	2910	2960	3010	1040	1050	1065
PP5	572	581	590	98	98	99	2860	2905	2950	490	490	495
PP6	563	569	579	56	56	57	2815	2845	2895	280	280	285
PP7	590	600	611	78	79	80	2950	3000	3055	390	395	400
PP8	596	606	616	89	89	90	2980	3030	3080	445	445	450
PP9	589	599	609	56	57	57	2945	2995	3045	280	285	285
PP10	584	593	603	32	32	32	2920	2965	3015	160	160	160
PP11	583	593	603	33	34	34	2915	2965	3015	165	170	170
PP12	600	610	620	23	23	25	3000	3050	3100	115	115	125
PT1	587	597	608	583	587	591	5870	5970	6080	5830	5870	5910
PT2	649	660	670	545	553	557	6490	6600	6700	5450	5530	5570
PT3	537	544	554	678	688	694	5370	5440	5540	6780	6880	6940
PT4	577	588	597	608	614	622	5770	5880	5970	6080	6140	6220
PT5	497	505	514	740	753	762	4970	5050	5140	7400	7530	7620
PT6	593	603	613	1292	1321	1340	5930	6030	6130	12920	13210	13400
TOTAL	12202	12401	12610	5908	5988	6064	81776	83108	84514	51936	52690	53326

Tabla 19 Costos del sistema de almacenamiento FFS – D2 – L2.

Proceso Flexible Flow Shop – Demanda Tipo 3 – Lead Time 2												
Factor	PID			DMC			PID			DMC		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
MP1	572	577	586	58	58	58	4004	4039	4102	406	406	406
MP2	552	565	571	41	41	44	3864	3955	3997	287	287	308
MP3	547	557	566	45	45	45	3829	3899	3962	315	315	315
PP1	488	499	506	212	212	214	2440	2495	2530	1060	1060	1070
PP2	530	539	549	288	288	291	2650	2695	2745	1440	1440	1455
PP3	541	548	558	487	489	493	2705	2740	2790	2435	2445	2465
PP4	528	538	548	287	287	290	2640	2690	2740	1435	1435	1450
PP5	520	529	539	136	137	138	2600	2645	2695	680	685	690
PP6	509	517	527	80	80	83	2545	2585	2635	400	400	415
PP7	537	547	557	111	111	112	2685	2735	2785	555	555	560
PP8	544	557	569	125	126	128	2720	2785	2845	625	630	640
PP9	543	550	563	81	82	82	2715	2750	2815	405	410	410
PP10	535	544	554	49	49	49	2675	2720	2770	245	245	245
PP11	535	544	554	48	49	49	2675	2720	2770	240	245	245
PP12	551	560	570	31	31	32	2755	2800	2850	155	155	160
PT1	535	545	555	815	823	824	5350	5450	5550	8150	8230	8240
PT2	589	601	612	760	761	767	5890	6010	6120	7600	7610	7670
PT3	487	496	505	958	959	967	4870	4960	5050	9580	9590	9670
PT4	524	535	544	844	847	854	5240	5350	5440	8440	8470	8540
PT5	452	460	468	857	863	873	4520	4600	4680	8570	8630	8730
PT6	540	550	560	1302	1301	1344	5400	5500	5600	13020	13010	13440
TOTAL	11159	11358	11561	7615	7639	7737	74772	76123	77471	66043	66253	67124

Tabla 20 Costos del sistema de almacenamiento FFS – D3 – L2.

# Costos nivel de inventario Demanda tipo 2 – Lead Time 1

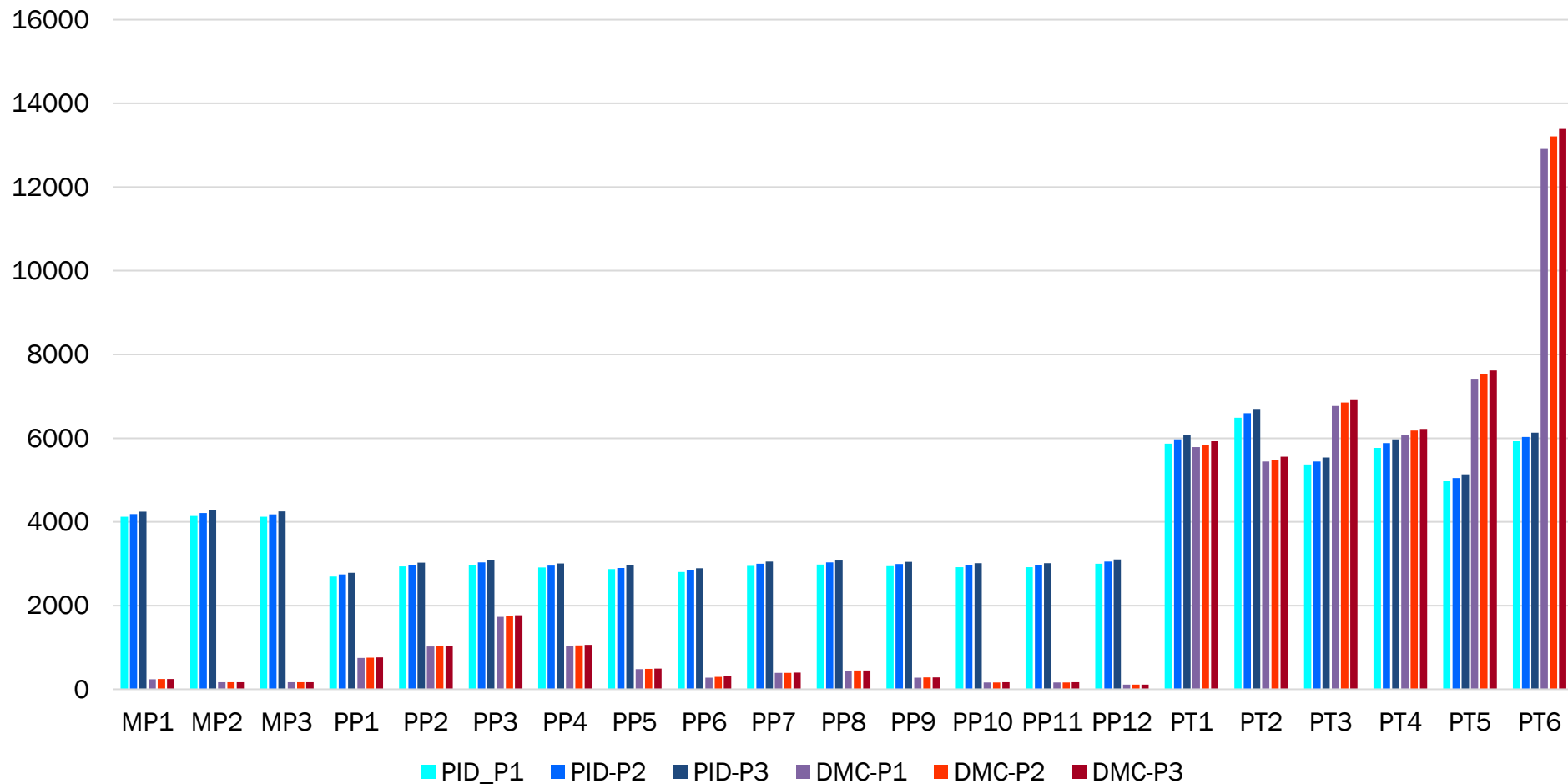
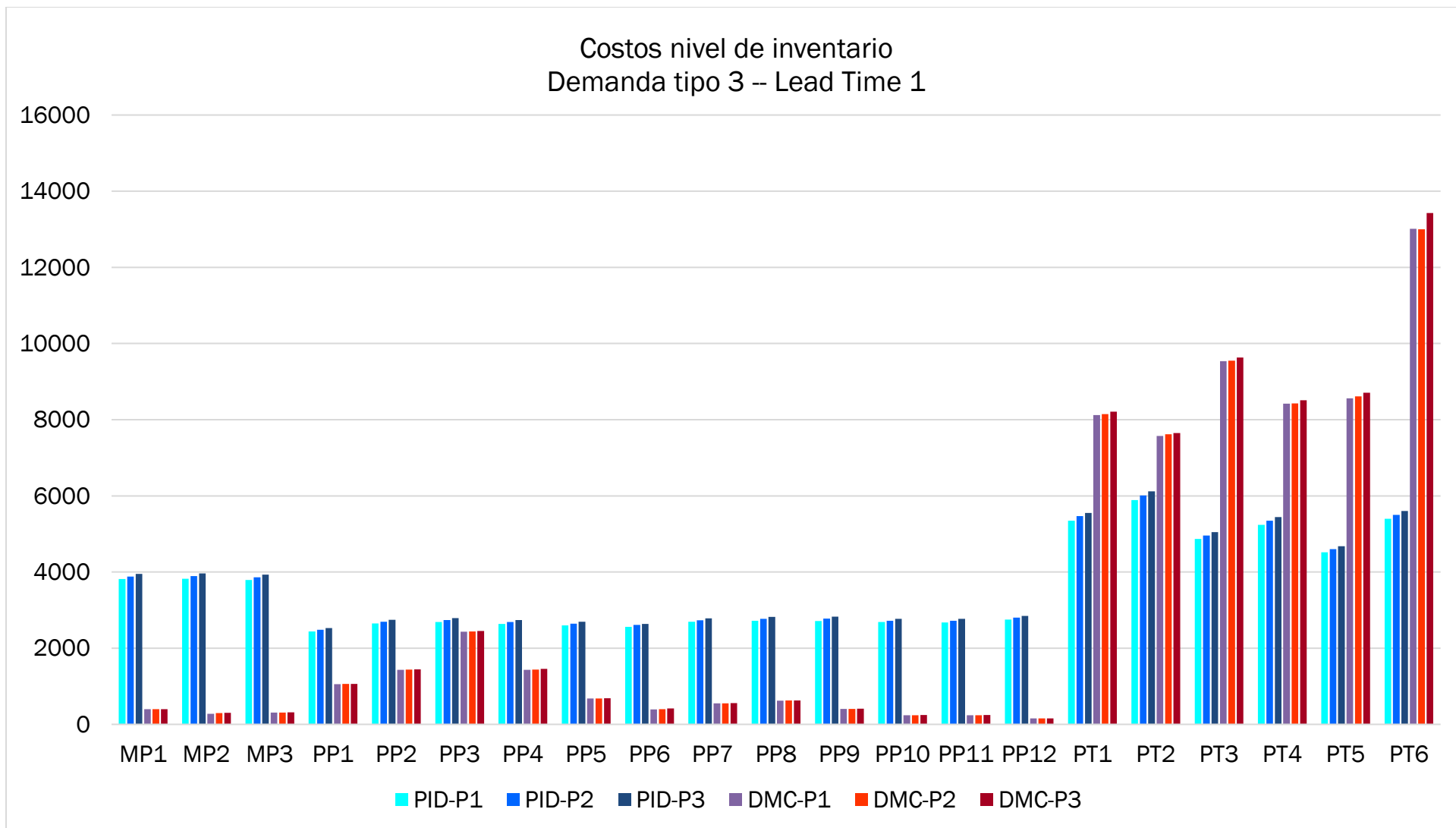


Ilustración 618 Costos del sistema de almacenamiento FFS – D2 – L1.



*Ilustración 619 Costos del sistema de almacenamiento FFS – D3 – L1.*

# Costos nivel de inventario Demanda tipo 1 – Lead Time 2

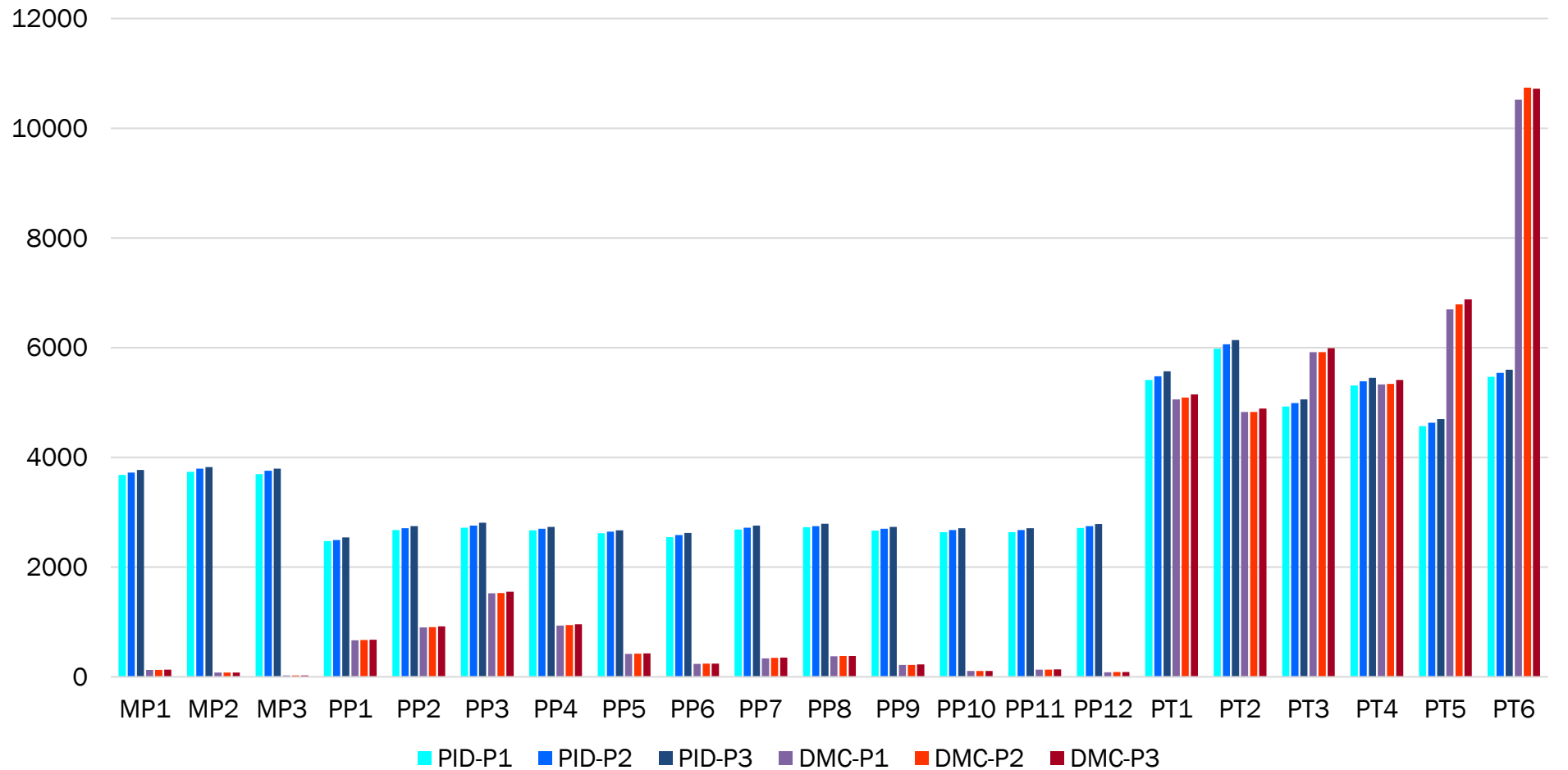


Ilustración 620 Costos del sistema de almacenamiento FFS – D1– L2.

# Costos nivel de inventario Demanda tipo 2 – Lead Time 2

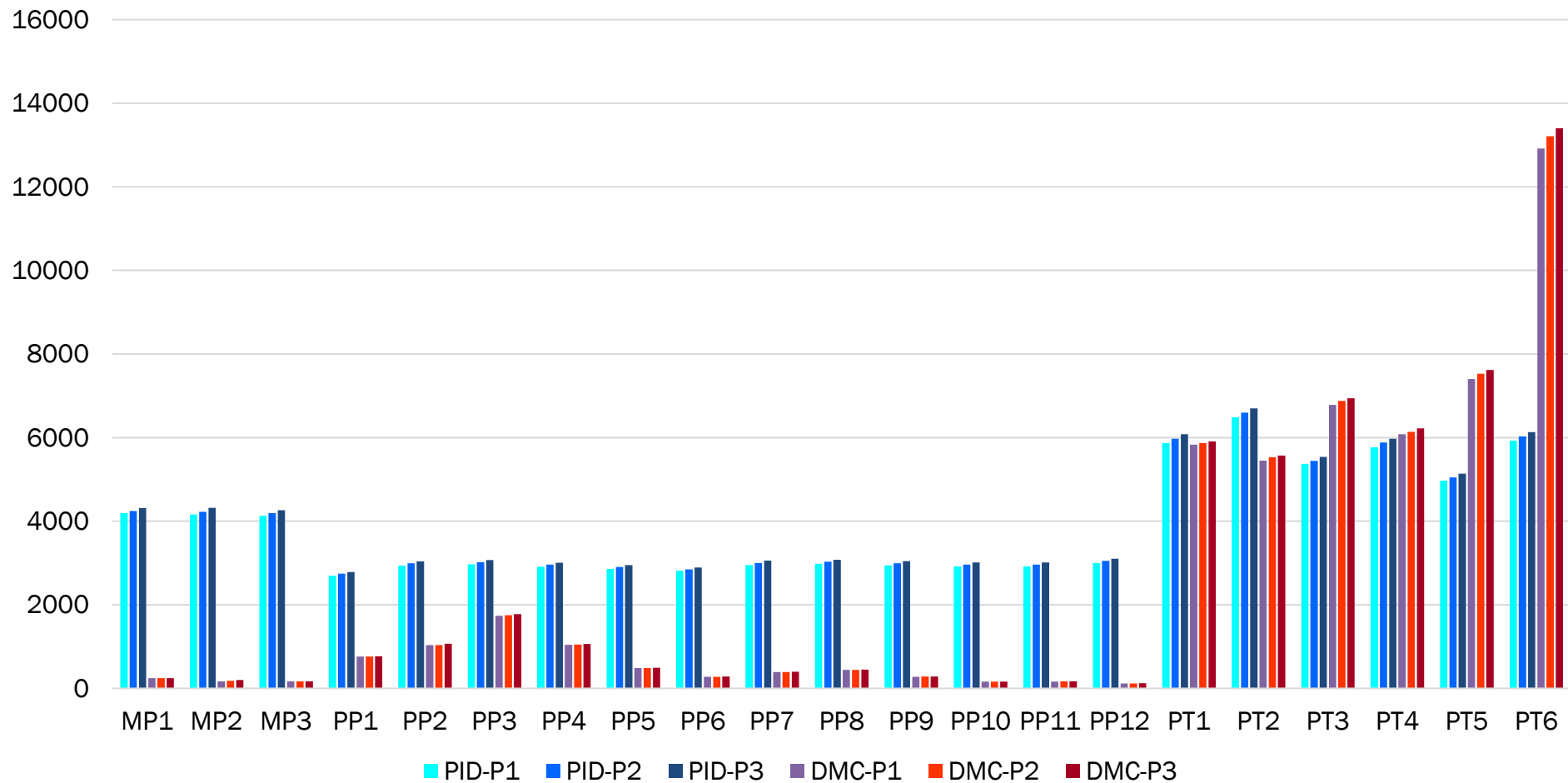


Ilustración 621 Costos del sistema de almacenamiento FFS – D2– L2.

# Costos nivel de inventario Demanda tipo 3 – Lead Time 2

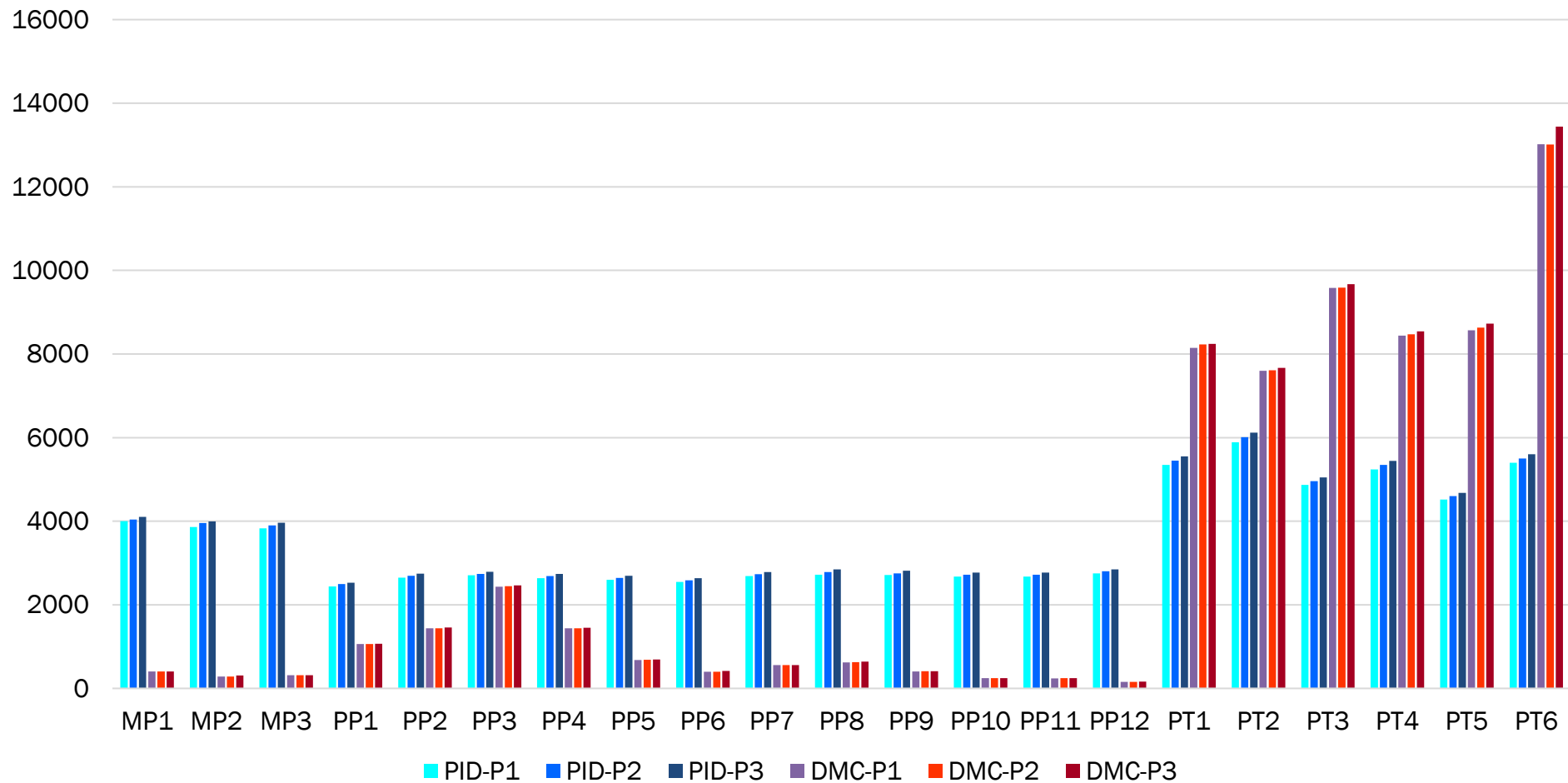


Ilustración 622 Costos del sistema de almacenamiento FFS – D3– L2.



